

参赛密码 _____
(由组委会填写)

第十二届“中关村青联杯”全国研究生 数学建模竞赛

学 校 三峡大学

参赛队号 11075030

1.徐高贵

队员姓名 2.陈廷

3.张慧

参赛密码 _____
(由组委会填写)



第十二届“中关村青联杯”全国研究生 数学建模竞赛

题 目 水面舰艇编队防空和信息化战争评估模型

摘 要：

本文研究了水面舰艇防御敌来袭导弹以及信息化作战评估问题，运用多目标规划模型解决编队最佳队形问题，建立优化模型求解出编队防御敌来袭导弹对我指挥舰攻击时的抗饱和攻击能力。在编队得到空中预警机的帮助时，根据几何关系，计算出编队的抗饱和攻击能力。运用支持向量机模型判别出空中目标可能的意图，并根据信息化战争相关概念建立了基于云模型和D-S证据推理的防空信息战系统评估模型。

对于问题一：考虑到防空拦截距离最大、最危险方向抗饱和攻击能力最大、20 度到 220 度全方位覆盖等对队形的影响，建立了多目标规划模型，利用层次分析法转化成单目标，并利用 Lingo 软件进行求解。得到半环形预警式队形为最佳队形，队形中护卫舰相对指挥舰的方位和距离如下表所示。

护航舰	A	B	C	D
偏向角（度）	45	95	145	195
与指挥舰的距离（km）	47.32	47.32	47.32	47.32

对于问题二：利用定性与定量分析找出编队最危险方向为边界方向，针对该方向多批次来袭导弹的情形，对编队所有舰艇的独立拦截能力进行分析，建

立概率模型，运用几何理论计算出编队防御敌来袭导弹对我指挥舰攻击时的抗饱和攻击能力为 11。在最危险方向上，各舰拦截来袭导弹的批数如下表所示。

	指挥舰	护卫舰 A	护卫舰 B	护卫舰 C	护卫舰 D	抗饱和攻击能力
批数	4	3	2	1	1	11

对于问题三：利用空中预警机改良信息探测系统，编队防御性能提升的问题，在无需考虑探测范围的限制条件下，建立几何关系模型，运用 MATLAB 进行求解，得到编队防御敌来袭导弹对我指挥舰攻击时的抗饱和攻击能力为 21，是没使用空中预警机情况下的 1.91 倍，在最危险方向上，各舰拦截来袭导弹的批数如下表所示。

	指挥舰	护卫舰 A	护卫舰 B	护卫舰 C	护卫舰 D	抗饱和攻击能力
批数	6	8	4	2	1	21

对于问题四：解决识别空中各目标可能的意图问题，建立了支持向量机模型。先对已知数据进行分析，对存在异常情况的数据运用 B 样条插值法，进行数据的剔除与修复。然后利用修复后的数据计算出指挥舰与空中目标的距离、方位角、航向角以及水平速度，并运用支持向量机模型对数据进行训练与识别，得出空中目标意图结果如下表所示。其中对于目标 41006893，意图由攻击状态转为侦察状态；对于目标 41006872，意图由攻击状态转为其它状态。

目标 ID	41006893	41006830	41006831	41006836	41006837	41006839
意图	攻击/侦查	其他	其他	其他	其他	侦查
目标 ID	41006842	41006851	41006860	41006872	41006885	41006891
意图	攻击	攻击	攻击	攻击/其他	攻击	侦查

对于问题五：对信息化战争的结果进行分析或预测，本文建立了基于云模型和 D-S 证据推理的防空信息战系统评估模型，并运用此模型对海湾战争进行分析，结果表面海湾战争中多国部队的防空信息战系统效能很高，与实际相符合。

关键词：支持向量机；多目标规划；B 样条；云模型；D-S 证据推理

1. 问题重述

1.1 问题背景

我海军由 1 艘导弹驱逐舰和 4 艘导弹护卫舰组成水面舰艇编队在我南海某开阔海域巡逻，其中导弹驱逐舰为指挥舰，重要性最大。某一时刻 t 我指挥舰位置位于北纬 15 度 41 分 7 秒，东经 112 度 42 分 10 秒，编队航向 200 度（以正北为 0 度，顺时针方向），航速 16 节（即每小时 16 海里）。编队各舰上防空导弹型号相同，数量充足，水平最小射程为 10 千米，最大射程为 80 千米，高度影响不必考虑（因敌方导弹超低空来袭），平均速度 2.4 马赫（即音速 340 米/秒的 2.4 倍）。编队仅依靠自身雷达对空中目标进行探测，但有数据链，所以编队中任意一艘舰发现目标，其余舰都可以共享信息，并由指挥舰统一指挥各舰进行防御。

以我指挥舰为原点的 20 度至 220 度扇面内，等可能的有导弹来袭。来袭导弹的飞行速度 0.9 马赫，射程 230 千米，航程近似为直线，一般在离目标 30 千米时来袭导弹启动末制导雷达，其探测距离为 30 千米，搜索扇面为 30 度（即来袭导弹飞行方向向左和向右各 15 度的扇面内，若指挥舰在扇形内，则认为来袭导弹自动捕捉的目标就是指挥舰），且具有“二次捕捉”能力（即第一个目标丢失后可继续向前飞行，假设来袭导弹接近舰艇时受到电子干扰丢失目标的概率为 85%，并搜索和攻击下一个目标，“二次捕捉”的范围是从第一个目标估计位置算起，向前飞行 10 千米，若仍然没有找到目标，则自动坠海）。每批来袭导弹的数量小于等于 4 枚（即由同一架或在一起的一批飞机几乎同时发射，攻击目标和导弹航向都相同的导弹称为一批）。

由于来袭导弹一般采用超低空飞行和地球曲率的原因，各舰发现来袭导弹的随机变量都服从均匀分布，均匀分布的范围是导弹与该舰之间距离在 20-30 千米。可以根据发现来袭导弹时的航向航速推算其不同时刻的位置，故不考虑雷达发现目标后可能的目标“丢失”。编队发现来袭导弹时由指挥舰统一指挥编队内任一舰发射防空导弹进行拦截，进行拦截的准备时间（含发射）均为 7 秒，拦截的路径为最快相遇。各舰在一次拦截任务中，不能接受对另一批来袭导弹的拦截任务，只有在本次拦截任务完成后，才可以执行下一个拦截任务。指挥舰对拦截任务的分配原则是，对每批来袭导弹只使用一艘舰进行拦截，且无论该次拦截成功与否，不对该批来袭导弹进行第二次拦截。不考虑每次拦截使用的防空导弹数量。

1.2 需要解决的问题

1、在未发现敌方目标时，设计编队最佳队形（各护卫舰相对指挥舰的方位和距离），应对所有可能的突发事件，保护好指挥舰，使其尽可能免遭敌导弹攻击。

2、当不考虑使用电子干扰和近程火炮（包括密集阵火炮）等拦截手段，仅使用防空导弹拦截来袭导弹，上述编队防御敌来袭导弹对我指挥舰攻击时的抗饱和攻击能力如何（当指挥舰遭遇多批次导弹几乎同时攻击时，在最危险的方向上，编队能够拦截来袭导弹的最大批数。）？

3、如果编队得到空中预警机的信息支援，对距离我指挥舰 200 千米内的所有来袭导弹都可以准确预警（即通报来袭导弹的位置与速度矢量），编队仍然保

持上面设计的队形，仅使用防空导弹拦截敌来袭导弹对我指挥舰攻击时的抗饱和攻击能力（定义同上）提高多少？

4、预警机发现前方有 12 批可疑的空中目标，从 t 时刻起，雷达测得的目标位置信息在附件 1 的表格中（说明：表中作战时间为 time_t 格式，即从 1970 年 1 月 1 日 0 时起到某一时刻的秒数；目标位置经纬度的单位为弧度；目标高度的单位为米），各目标雷达反射面积见表 1。用于判断空中目标的意图的知识和规则的样本见表 2。请分析识别空中各目标可能的意图。（相关的背景知识介绍参见附件 A）。

5、如果我方的预警机和水面舰艇编队的雷达和通信系统遭到敌方强烈的电子干扰，无法发现目标，也无法传递信息，这时，后果将是极其严重的，我编队防空导弹的拦截效能几乎降低到零。由此引起人们的深思，信息化条件下作战对传统的作战评估模型和作战结果已经产生重要的甚至某种程度上是决定性的影响！在海湾战争（相关资料参见附件 B）的“沙漠风暴”行动开始前，一些军事专家用传统的战争理论和战争评估模型进行预测，包括用兰彻斯特战争模型预测战争进程，结果却大相径庭，战争的实际结果让他们大跌“眼镜”。那么信息化战争的结果应该用什么样的模型来分析或预测呢？这是一个极具挑战性，又十分有意义的课题。请尝试建立宏观的战略级信息化战争评估模型，从一般意义上反映信息化战争的规律和特点，利用模型分析研究信息系统、指挥对抗、信息优势、信息系统稳定性，以及其它信息化条件下作战致胜因素的相互关系和影响（信息化战争相关概念参见附件 C）。并通过信息化战争的经典案例，例如著名的海湾战争，对模型加以验证。

2. 模型的假设与符号说明

2.1 模型的假设

假设 1: 舰艇编队内部的舰载装备和探测器材齐全完好。

假设 2: 来袭导弹发射的瞬间, 舰艇是静止的。

假设 3: 电磁干扰为近船干扰, 干扰距离小于舰艇的最小射程。

假设 4: 考虑到误伤情况, 当来袭导弹进入任何舰艇的 10 千米范围内, 均不能使用防空导弹进行拦截。

2.2 符号说明

符号说明

符号	符号说明
r	护卫舰与指挥舰的距离
S_1	护卫舰 A 与扇面初始角度的直线相交的面积
S_2	护卫舰 A 和 B 相交的面积
S_3	护卫舰 B 和 C 相交的面积
S_4	护卫舰 C 和 D 相交的面积
S_5	护卫舰 D 与扇面终止终止角度的直线相交的面积
d	来袭导弹与护卫舰之间的距离
L_0	编队各舰上防空导弹的最小射程
L_1	编队各舰上防空导弹的最大射程
v_0	编队各舰上防空导弹的速度
v_1	来袭导弹的速度

注: 其它符号在正文中详细标注。

3. 问题的分析

本题讨论的是水面作战，舰艇编队防空反导作战的问题。防空队形的优劣直接关系到编队内部各种器械的协同效率，舰艇编队应根据己方舰艇的数量和防空武器的性能，综合编队的自我保护效果，雷达探测设备预警、探测效果、活力发挥效果等方面因素对防空队形的要求，选择适当的防空队形样式，一边最大限度的发挥各舰的防御效能，提高编队的整体对空防御能力。

问题一的分析

问题一要求在尽可能的应对突发事件，保护好指挥舰的条件下，设计编队最佳队形。根据查阅的相关文献，最佳队形需要考虑两个方面：首先是护卫舰与驱逐舰之间的距离，它对护卫舰有效探测目标的距离产生影响。如果护卫舰与驱逐舰之间的距离太近，整个编队将很难探测到更远距离的来袭导弹，舰艇上防空导弹的射程优势将难以发挥。因此，可以认为护卫舰与驱逐舰之间的距离越远，作战效果越好；其次是护卫舰相对于驱逐舰的角度，即驱逐舰为圆心，正北方向为 Y 轴，护卫舰与驱逐舰之间的角度为护卫舰与驱逐舰连线与水平方向的夹角。每个护航舰与驱逐舰之间的夹角决定了护航舰之间的距离，如果护航舰之间距离太远，则相邻的护航舰之间有可能出现雷达无法探测到的空白区；如果距离太近，则边缘区域有可能成为探测能力薄弱区，导弹击中驱逐舰的概率将会增加。

问题二的分析

问题二要求根据问题一的编队队形，不考虑使用电子干扰和近程火炮（包括密集阵火炮）等拦截手段，仅使用防空导弹拦截来袭导弹的抗饱和攻击能力。文献资料显示：抗饱和能力是指应对敌方饱和攻击时的抗打击能力，以短时间内拦截对方导弹数量或其它攻击武器数量为指标，是衡量防空系统性能的主要指标。对于一种编队，各个方向的防御能力无法达到完全一致，总会存在一个或多个防御能力最弱的方向，称之为最危险方向。因此要求编队的抗饱和攻击能力，只需要求出最危险方向上的抗饱和能力。

根据问题一的编队进行分析，首先是寻找防御最薄弱的区域。在编队队形优化之前，相邻护卫舰之间的区域属于防御薄弱区。在队形优化后，相邻护卫舰的区域有两艘舰艇的雷达探测覆盖区，探测到导弹的概率增加，且有三艘舰艇在射程范围内，防御能力大大增加，而边界区域受到雷达探测距离限制与防空导弹射程限制，成为了防御能力最薄弱的区域。找出防御最薄弱的区域后，根据已知数据，求解出该区域能够拦截来袭导弹的最高批次，即为编队的抗饱和攻击能力。

然而需要注意的是，由于在距舰艇 20 千米内来袭导弹是一定会被探测到的，而在 23-30 千米内，来袭导弹被探测到的概率呈均匀分布，因此需要通过数学方法对来确定距舰艇 0-30 千米范围内的有效探测范围，这也是本题求解的关键之一。

问题三的分析

问题三增加了编队得到空中预警机的信息支援，在距指挥舰 200 千米范围内均能对来袭导弹进行准确预警。此处条件的增加，让整个编队的探测能力达

到最大，消除了射程范围内探测距离的限制。因此，在正常情况下，编队剩余抗饱和攻击能力的约束就只有防空导弹的射程约束。

根据第二问分析，最危险的方向是边界 20 度和 220 度的方向。由于编队呈对称结构，因此只要求出一边能拦截的最多导弹批次即可。以 20 度为例，分别对指挥舰和各护卫舰独立求解各自能拦截的导弹批次。在这里需要注意的是，由于探测距离已经大于射程距离，因此舰艇可以在来袭导弹到达射程范围前就进行发射，在最大射程的距离处拦截导弹。依次将各舰艇拦截批次进行累加，得到编队在 20 度方向上的抗饱和能力，即最多拦截批次。同理可得 220 度方向上的抗饱和能力。

问题四分析

针对问题四，空中目标意图的分析是现代防空作战中理解战场态势、预测目标行动及威胁的关键。但是通过舰载雷达接收的目标相关信息可能会由于传感器性能及敌方干扰、欺骗等行为，使得信息存在高度的不确定性；同时，由于作战的复杂性，用于推理的军事知识也存在着不确定性，所以我们根据相关的数据样本，建立一个目标意图估计数据库，运用基于最小二乘法的支持向量机模型来进行空中目标意图识别。

问题五分析

针对问题五，信息技术在改变航空兵战斗力性质和结构的同时，为作战双方战斗意志、决心和智慧的实施表达提供了新的渠道和手段，导致作战样式、战术形态发生了根本性变化。现代空战只有掌握制信息权才能掌握制空权，所以制信息权对于战争的进展和结局有着十分重要的影响。所以防空信息战效能对战争的胜负有着重要影响。本文从防空信息战效能的角度对战争进行评估。本文采用基于云模型和 D-S 证据推理的方法并结合专家评判方法对战争进行评估，并对海湾战争进行验证。

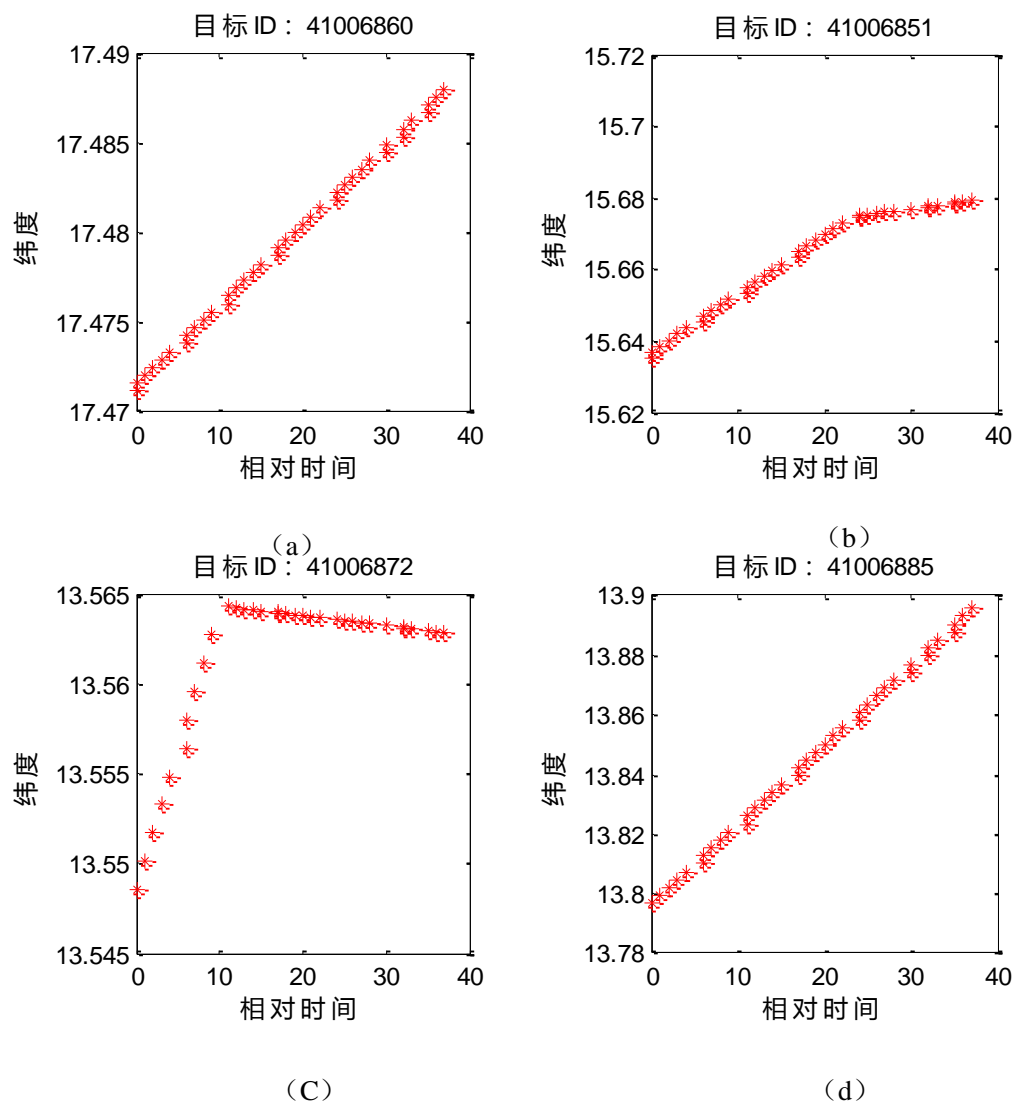
4. 数据的收集与处理

4.1 轨迹分析

附件中表 1 给出了 12 批可疑的空中目标的数据,包括作战时间、目标经度、目标纬度以及目标高度。为了保证数据的可靠性,对给出的 12 批的空中目标的数据,进行了轨迹分析,来验证数据的合理性。

4.1.1 时间与纬度的轨迹关系

如图 4-1 所示,以时间为横坐标,纬度为纵坐标,利用 matlab 分析了 12 个空中目标时间与纬度的关系,一般来说正常轨迹不会出现变异,而在绘出的吐血中发现有多个目标的纬度存在部分变异,需要对这些目标的进行进一步分析。



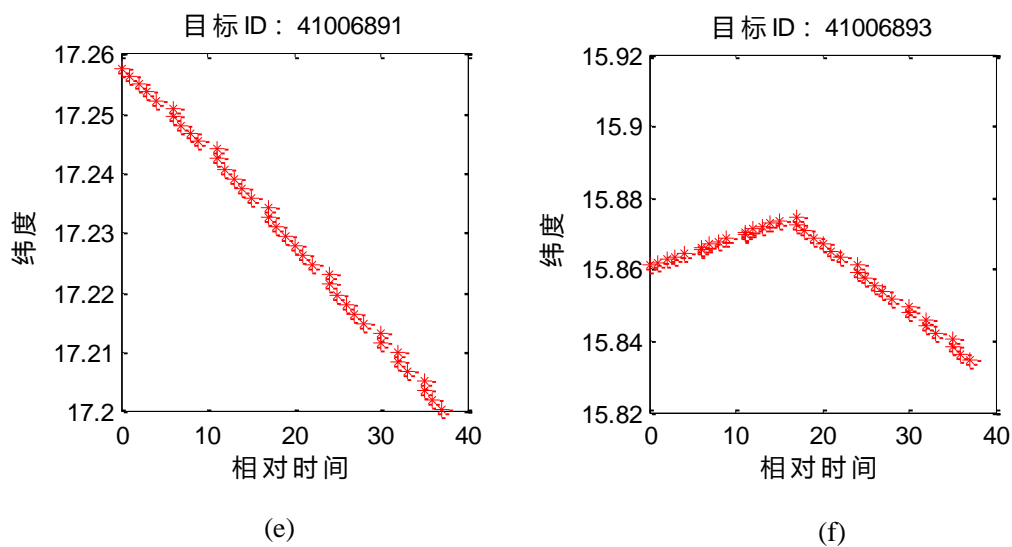
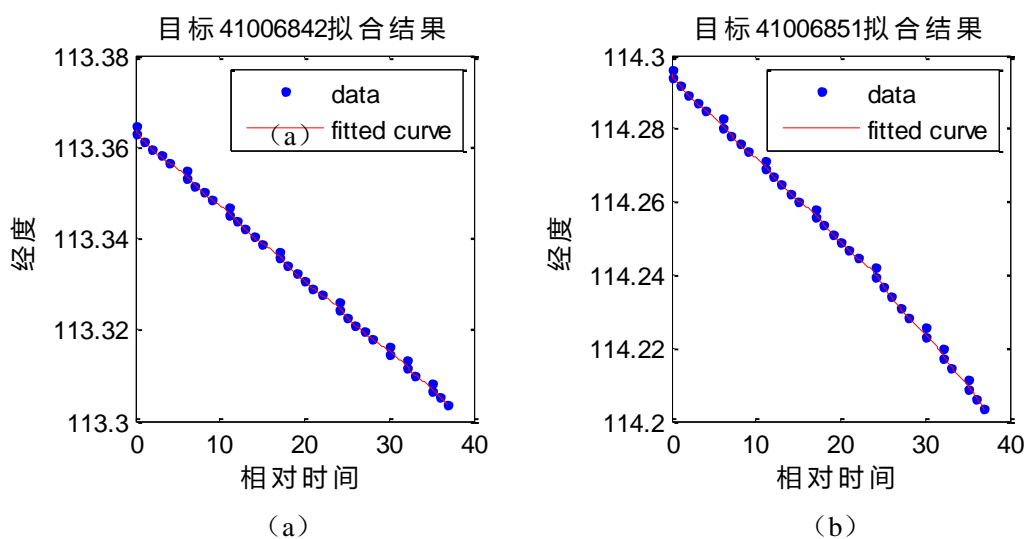


图 4-1：时间序列纬度轨迹图

4.1.2 时间与经度的轨迹关系

如图 4-2 所示，以时间为横坐标，经度为纵坐标，利用 matlab 分析了 12 个空中目标时间与经度的关系，发现有 6 个目标的数据存在异常，分别为目标 ID41006891、目标 ID41006842、目标 ID41006885、目标 ID41006851、目标 ID41006872 和目标 ID41006893，需要对这些目标的异常进行一步分析与处理。



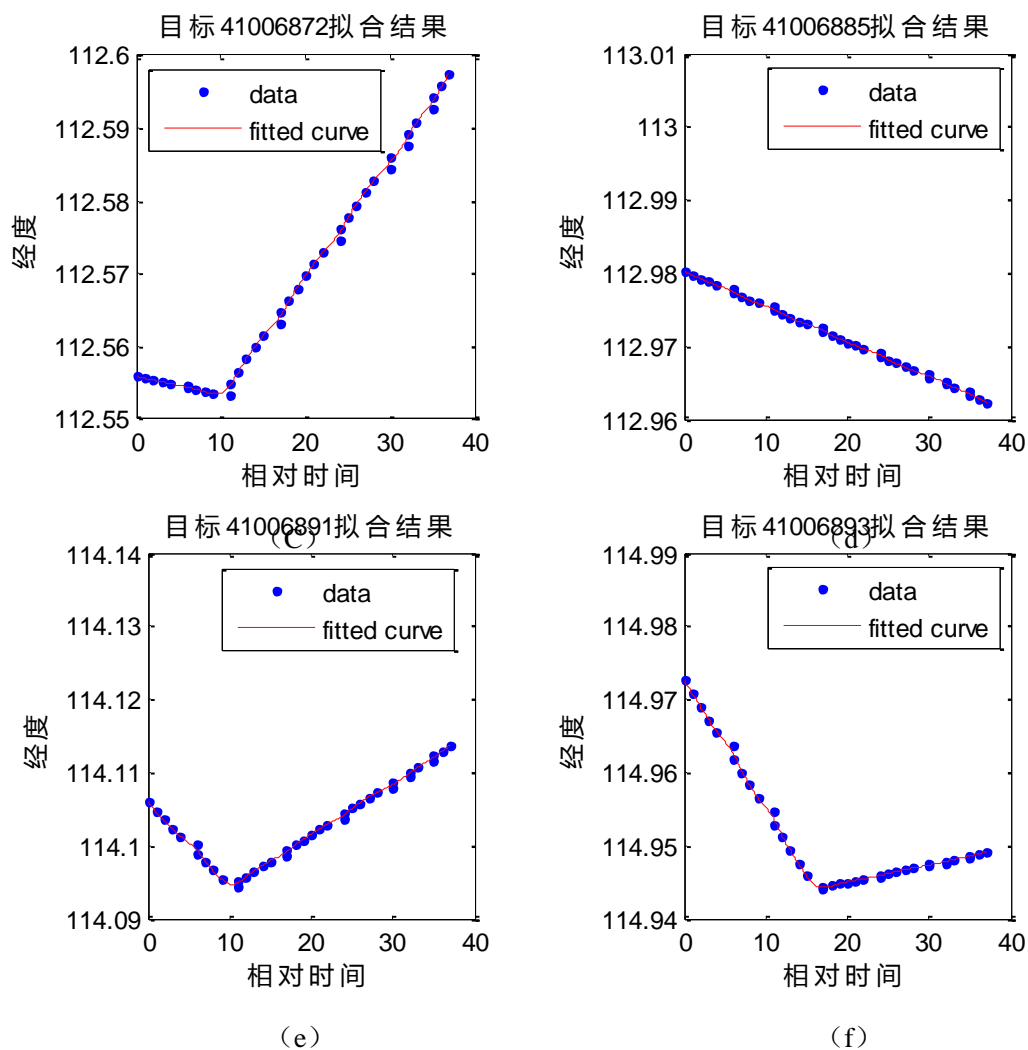


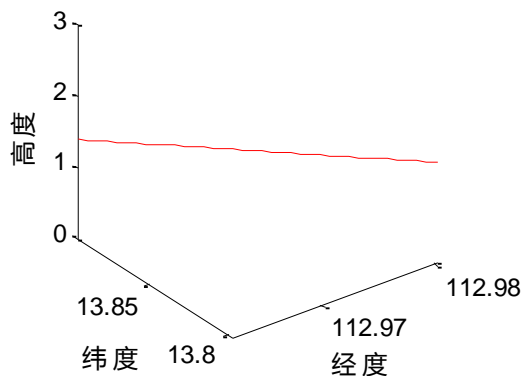
图 4-2: 时间序列经度轨迹图

4.1.3 空中目标的轨迹分析

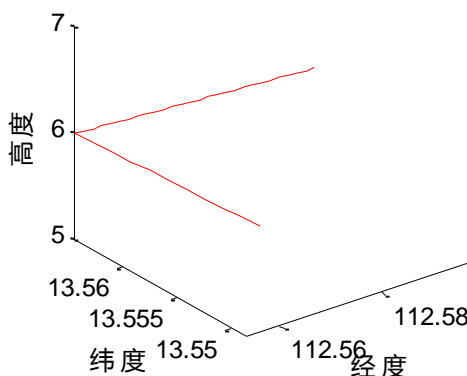
如图 4-2, 以经度为横坐标, 纬度为纵坐标, 利用 matlab 分析了 12 个空中目标的轨迹, 发现大多数目标的轨迹是直线轨迹, 如图 4-2 中的 (a); 有三个目标的轨迹是折现轨迹, 如图 4-2 中 (b)、(c)、(d); 有两个目标存在高度上的变化, 如图 4-2 中 (e)、(f)。

目标 41006885 的轨迹

目标 41006872 的轨迹



(a)



(b)

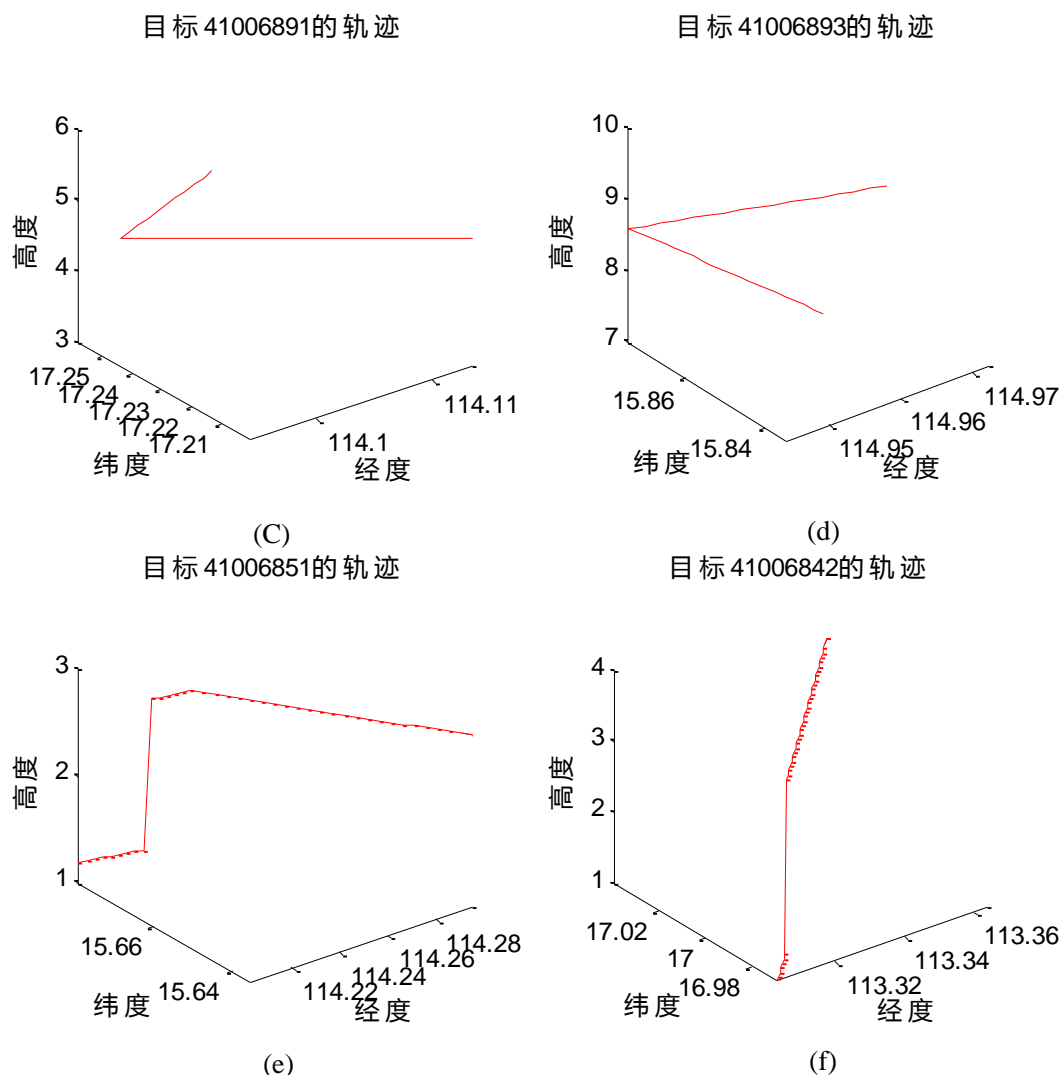


图 4-3：目标轨迹三维图

出现折现轨迹可能是空中目标发生了转向，对出现折现轨迹的目标计算其到达目标位置的时间，发现与所给数据吻合，说明折线行驶并没有影响空中目标到达目标位置，因此，折线轨迹不作为异常情况处理。

4.2 基于 B 样条数据的剔除与修复

对比上述三种轨迹分析，发现当有时间变量与经纬度相关时，轨迹中是位置点会有部分偏离趋势轨迹。细致分析所给的数据，给出的 12 个目标数据中，存在一个目标在同一作战时间，出现多个经纬度位置的情况。出现这种情况，有两个猜测：第一，时间后面有更精确的数位；第二，异常数据。题中未给出更精确的数位，无法知道这两个时间的先后位置，因此，此处将重复数据作为异常数据，利用 B 样条拟合来进行数据的剔除与修复。

存在本文考虑均匀 B 样条曲线，给定 $n+1$ 个控制点 P_i ($i=0,1,2,\dots,n$) 的坐标 P_i ， n 次 B 样条曲线段的参数表达式为

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i F_{i,n}(t), t \in [0,1]$$

式中为 n 次 B 样条基函数，其形式为

$$F_{i,n}(t) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{n-i} (-1)^j C_{n+1}^j (t+n-i-j)^n$$

$$\text{其中 } C_{n+1}^j = \frac{(n+1)!}{j!(n+1-j)!}$$

根据上述模型，对原始数据进行修复，得到修复后的数据，如下表 4-4（详情见附件）：

表 4-4：修复后的空中目标数据

目标 ID	作战时间	目标纬度	目标经度	目标高度
41006830	1471427976	. 249264711886789	1. 94281171850166	7000
41006830	1471427977	. 249284249515577	1. 94282282157269	7000
41006830	1471427978	. 249303787144365	1. 9428339246993	7000
41006830	1471427979	. 249323324773153	1. 94284502788147	7000
41006830	1471427980	. 249342862401941	1. 94285613111922	7000
41006830	1471427982	. 249362400030729	1. 94286723441254	7000
...
41006893	1471428011	. 276430747857601	2. 00623207011008	8600
41006893	1471428012	. 276397489977449	2. 0062362875472	8600
41006893	1471428013	. 276364232097297	2. 0062405049443	8600

5. 问题一的求解

问题一需要在未发现敌方目标时，设计编队最佳队形。对于问题一的解答主要考虑两点，第一防空队形的最薄弱区域抗饱和能力最大，即拦截导弹的能力最大；其次，保证在薄弱区域抗饱和能力的前提下，雷达搜索探测区域最大。

5.1 队形编排的背景知识

在建立模型前，首先考虑了典型的舰艇队形能否利用。典型的舰船队形有七种，分别为人字形、菱形、梯形、横队、环队、纵队和楔形。

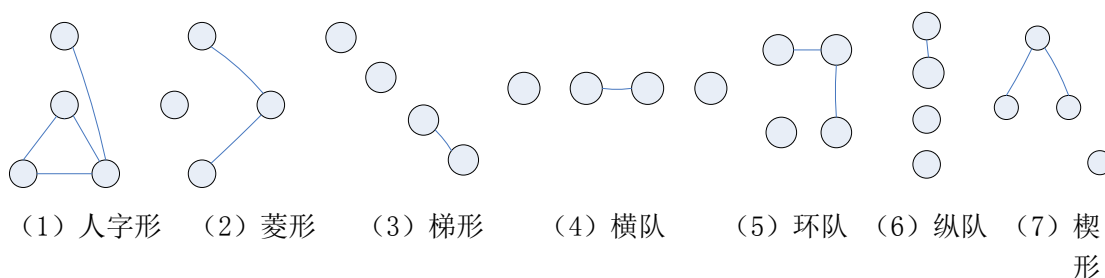


图 5-1：典型防空队形

不同舰艇编队在不同类型的战斗中，有不同功能。通常依据敌情、任务、海区情况、舰艇数量和舰艇武器装备等确定。纵队，用于舰炮攻击、导弹攻击，布雷。横队，用于宽大正面搜索，导弹艇导弹攻击，对潜艇搜索和攻击，布雷、非接触扫雷、炸雷，登陆舰艇和登陆工具的登陆突击，设置潜艇幕。梯队，用于舰炮攻击、导弹攻击、鱼雷攻击，布雷、接触扫雷、炸雷，设置潜艇幕。人字队和楔形队，用于导弹攻击、对潜艇搜索和攻击，战斗舰艇编队对空和对潜防御。菱形队，用于战斗舰艇编队对空和对潜防御。环形队形，用于航空母舰编队遂行各种任务，护航运输队、登陆输送队编队航行。

5.2 简易队形的剔除

在典型队形中，横队、纵队、楔形防空队形是基本队形。这是在火炮时期就已经产生的队形，它能发挥出每艘军舰的最大舷侧火力。在本题中，如果选择横队、纵队，包括梯形队，探测距离的优势只能发挥在某一个特定的方向上。舰队的探测能力，与舰队对来袭导弹的拦截能力关系密切。探测的距离越远，舰队应对来袭的能力越强。横队、纵队，梯形队在各个方向上的探测距离是不相等的，且差异较大，这就意味着舰队的导弹拦截能力在各个方向是不均等的，差异悬殊。无法保证整体舰队的全方位的探测搜索优势，将会导致薄弱区域的拦截导弹能力低下。本题中，舰队的最大探测范围为 30km，编队薄弱区域探测导弹的实际有效范围为 20km—30km。因此，使用横队、纵队和梯形这几种队形并不能应对全方位的导弹来袭情况。

环形防空队形是很容易想到的队形，这种队形在二战时期已经出现。环形防空队形可能出现两种情况：一种是指挥舰与护卫舰同等位置的环形队形，另一种是预警式环形队形。如下图：

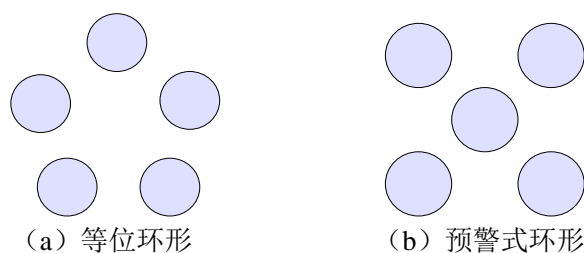


图 5-2: 环形防空队形情况

图 5-2 中等位环形队形是指指挥舰与护航舰的地位相同，与四艘护航舰一起组成一个环形，共同抵抗来袭导弹。这种防护看似比较周密，全方位的雷达探测强度比较均匀，但是整个舰队的拦截来袭导弹能力也是最小的，只能抵抗一批次的来袭导弹攻击，探测有效距离也只有 20km—30km。预警式的队形是将指挥舰放在中心位置，其余四艘护航舰分布在四周。这种队形比起等位环形在在探测范围上具有一定优势，即导弹拦截能力有所提升，可以拦截多批次的来袭导弹，但探测薄弱区域仍然无法对抗多批次导弹来袭，因此这些区域的拦截能力依然有待提高。基于此，下面将对这种预警式队形进行优化，旨在满足探测范围的同时，提高整个舰队的抗饱和能力。

5.3 模型的准备

本文从典型的防空队形中选择适合进行优化的预警式防空队形，由题中给出条件可知，在以指挥舰为原点的 20 度至 220 度扇面内，等可能的有导弹来袭。因此，只需考虑 20 度至 220 度的区域进行对空防御。

在考虑 20 度到 220 度的区域的防空队形编排时，首先一个极限情况，即探测距离最长，探测覆盖面最广的情况。如图 5-3 中的 (c) 图，以指挥舰为圆心，舰艇最大探测距离 30km 为半径，画出指挥舰与四艘护航舰的编排队形。在这种情况下，整个舰队可探测导弹的距离是最远的，但是在相邻护卫舰之间相切的探测区域属于整个舰队中的最薄弱区域，导弹将在离指挥舰最近的区域被探测到，并且在首次探测到后，舰队还可能出现丢失目标的情况。若是导弹从这些方位进行袭击，舰队探测到导弹的概率将会降低，指挥舰被击中的概率将会增加。因此本文通过改变行指挥舰与护卫舰之间的距离和角度，使得原先相切的探测范围重叠相交，增加边缘薄弱区域的探测强度。

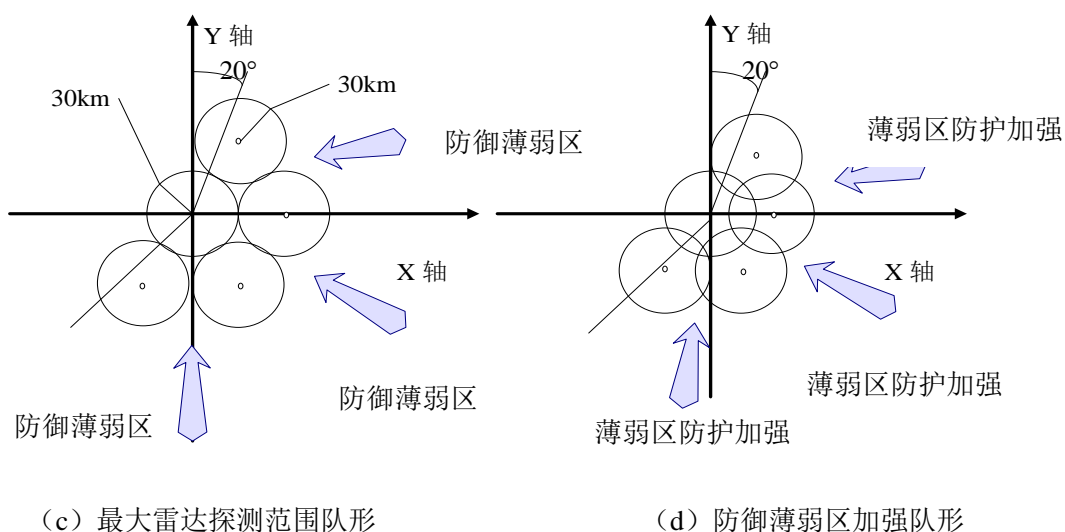


图 5-3: 强化防御能力的舰队队形

5.4 模型的建立

5.4.1 符号定义

4 艘护卫舰 A, B, C, D 按顺时针方向排列在以指挥舰为圆心, 30km 为半径的 20 度至 220 度扇面曲线上。

4 艘护卫舰距离指挥舰的距离应该相等, 记作 r 。

θ_0 为以指挥舰为原点的扇面起始角度 20 度。

θ_1 为护卫舰 A 与指挥舰的夹角。

θ_2 为护卫舰 B 与指挥舰的夹角。

θ_3 为护卫舰 C 与指挥舰的夹角。

θ_4 为护卫舰 D 与指挥舰的夹角。

θ_5 为以指挥舰为原点的扇面终止角度 220 度。

舰艇发现来袭导弹的随机变量服从均匀分布, 均匀分布的范围是导弹晕该舰之间距离在 20-30 千米。可知舰艇能够发现导弹的最远距离为 30 千米。故护卫舰与指挥舰的半径均为 30 千米, 由上述定义可知 4 艘护卫舰的圆心为 $A(r, \theta_1)$, $B(r, \theta_2)$, $C(r, \theta_3)$, $D(r, \theta_4)$ 。

由上述描述可知: $20 = \theta_0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \theta_5 = 220$

5.4.2 模型的建立

S_1 为护卫舰 A 与扇面初始角度的直线相交的面积如图 5-4 所示:

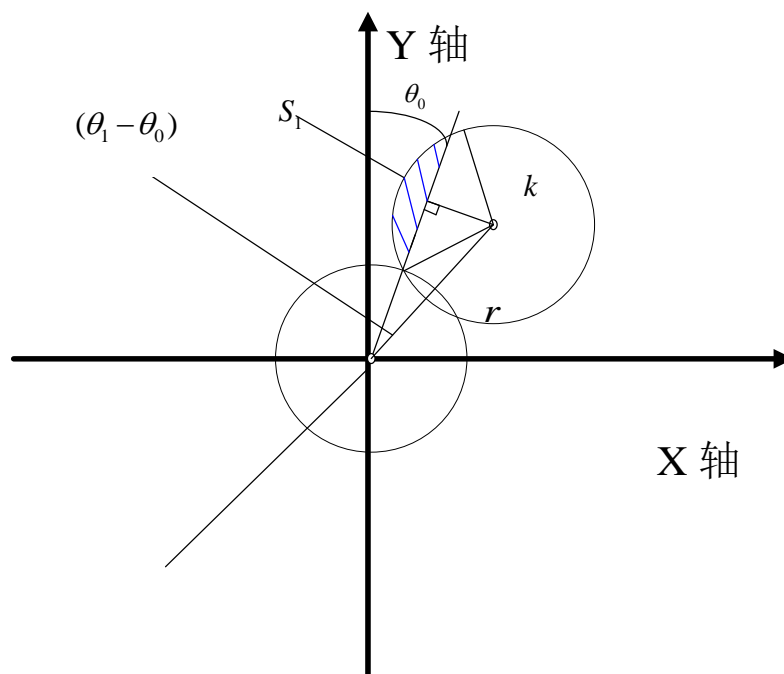


图 5-4: 护卫舰 A 与指挥舰的探测范围相交图

$$\begin{aligned}
S_1 &= \pi k^2 \times \frac{2 \arccos \frac{r \sin(\theta_1 - \theta_0)}{k}}{2\pi} - r \sin(\theta_1 - \theta_0) \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} \\
&= k^2 \times \arccos \frac{r \sin(\theta_1 - \theta_0)}{k} - r \sin(\theta_1 - \theta_0) \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}
\end{aligned}$$

S_2 为护卫舰 A 和 B 相交的面积如图 5-5 所示：

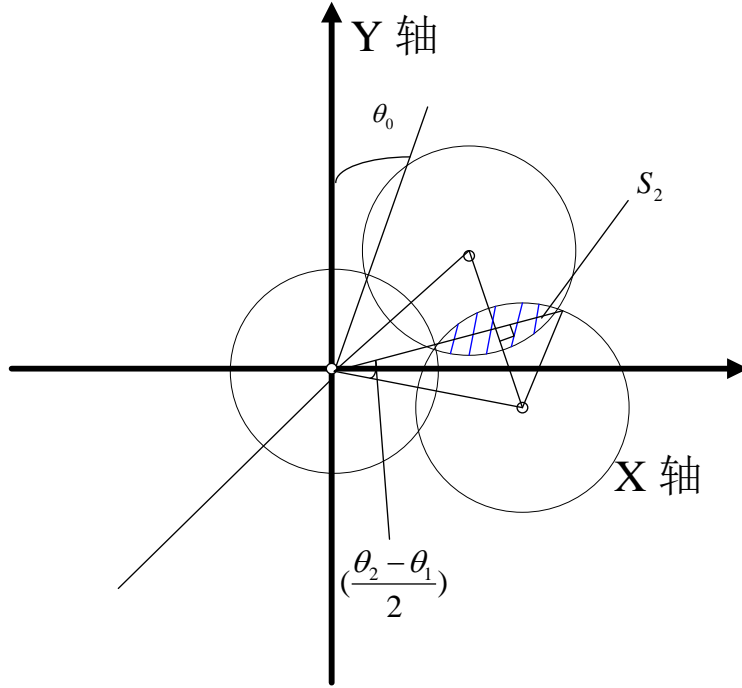


图 5-5：护卫舰 A 与护卫舰 B 的探测范围相交图

$$\begin{aligned}
S_2 &= 2 \left[\pi k^2 \times \frac{2 \arccos \frac{r \sin \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{2}}{k}}{2\pi} - r \sin \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{2} \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2 \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{2}} \right] \\
&= 2 \left[k^2 \times \arccos \frac{r \sin \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{2}}{k} - r \sin \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{2} \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2 \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{2}} \right]
\end{aligned}$$

S_3 为护卫舰 B 和 C 相交的面积，其相交情况与护卫舰 A 和 B 相交情况相同：

$$S_3 = 2 \left[\pi k^2 \times \frac{2 \arccos \frac{r \sin \frac{(\theta_3 - \theta_2)}{2}}{k}}{2\pi} - r \sin \frac{(\theta_3 - \theta_2)}{2} \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2 \frac{(\theta_3 - \theta_2)}{2}} \right]$$

$$= 2 \left[k^2 \times \arccos \frac{r \sin \frac{(\theta_3 - \theta_2)}{2}}{k} - r \sin \frac{(\theta_3 - \theta_2)}{2} \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2 \frac{(\theta_3 - \theta_2)}{2}} \right]$$

S_4 为护卫舰 C 和 D 相交的面积与 S_2 、 S_3 的计算方法相同：

$$S_4 = 2 \left[\pi k^2 \times \frac{2 \arccos \frac{r \sin \frac{(\theta_4 - \theta_3)}{2}}{k}}{2\pi} - r \sin \frac{(\theta_4 - \theta_3)}{2} \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2 \frac{(\theta_4 - \theta_3)}{2}} \right]$$

$$= 2 \left[k^2 \times \arccos \frac{r \sin \frac{(\theta_4 - \theta_3)}{2}}{k} - r \sin \frac{(\theta_4 - \theta_3)}{2} \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2 \frac{(\theta_4 - \theta_3)}{2}} \right]$$

S_5 为护卫舰 D 与扇面终止终止角度的直线相交的面积, 起计算方法与 S_1 的计算方法相似:

$$S_5 = \pi k^2 \times \frac{2 \arccos \frac{r \sin(\theta - \theta_4)}{k}}{2\pi} - r \sin(\theta - \theta_4) \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2(\theta - \theta_4)}$$

$$= k^2 \times \arccos \frac{r \sin(\theta - \theta_4)}{k} - r \sin(\theta - \theta_4) \sqrt{k^2 - r^2 \sin^2(\theta - \theta_4)}$$

相交的地方为防护薄弱区, 应提高防护薄弱区的发现导弹的可能性, 即防护薄弱区的面积如果最小的面积达到最大, 即可实现防护薄弱区的加强。

即 $s = \min \{S_i\}, i=1, \dots, 5$, 当 s 达到最大时, 防护薄弱区得以加强。当 s 达到最大时, 防护薄弱区可得以加强。

即 $\max s, s = \min \{S_i\}, i=1, \dots, 5$ 。

此外, 如果防护薄弱区面积越大, 则同时会导致指挥舰与护卫舰之间的距离变短, 如果距离变短, 则舰艇发现导弹的可能性会大大降低, 所以在保证防护薄弱区得到加强的同时, 要保证指挥舰与护卫舰之间的距离尽可能大, 即 $\max r$

综上所述, 建立的编队防空模型为:

$\max r$

$\max s$

其中

$s = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5$, 且 $20 = \theta_0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \theta_5 = 220$, $30 < r < 60$

5.5 模型的求解与分析

防空队形的编排有很多种，不同的队形应对不同的防御要求。本问中要求编队能应对所有可能的突发情况，即要求整个编队既要满足雷达探测在各个方位探测距离要大致相当，不能出现悬殊较大的情况，又要保证整体的探测距离最远。根据建立的模型，将两个防御要求转换成相邻护卫舰探测区交叠的面积最大和护卫舰与指挥舰之间的距离最远两个目标来进行求解。根据题目已知的数据，利用 Lingo 进行编程，可求得以下以指挥舰为圆心的护卫舰的方位结果，如表 5-1 所示：

表 5-1：队形编排结果				
护航舰	A	B	C	D
偏向角度(度)	45	95	145	195
与指挥舰的距离（km）	47.32	47.32	47.32	47.32

根据表中数据，利用 CAD 作出精确的编队方位图，如图 5-6 所示：

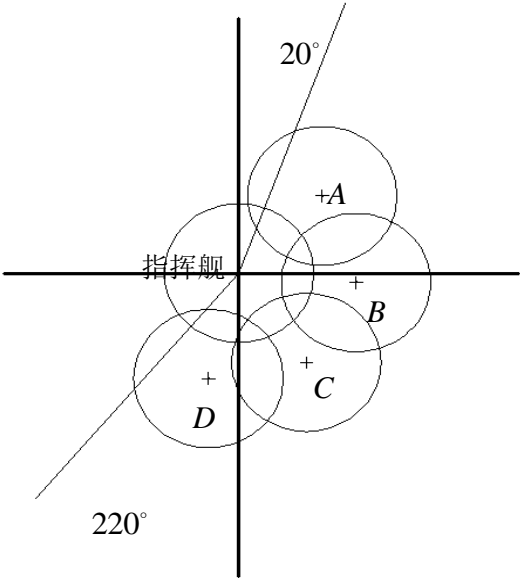


图 5-6：最优编队方位图

以指挥舰为圆心，正北方向为 Y 轴，正东方向为 X 轴。有表 5-1 的结果可知，护航舰 A 在据指挥舰 46.60485km 的北偏东 38.96 度方位上；护卫舰 B 在据指挥舰 46.60485km 的东偏南 3.14 度的方位上；护卫舰 C 在据指挥舰 46.60485km 的东偏南 56.86 度的方位上；护卫舰 D 在据指挥舰 46.60485km 的南偏西 20.58 度的方位上。

从整体编队的形状上来看，编队属于半环形编队。这种编队是一种预警式队形，二战时期开始出现。本题中编队可探测的最远距离为 77.32km。

6. 问题二的求解

空袭一方为达到减小突防损失的目的,常采用大密度、连续进袭的突防手段,使防空系统射击能力在某一特定时间内处于无法应付的“饱和状态”,以达到提高突防率的目的。这种“饱和状态”的程度可以用防空导弹抗饱和攻击能力来表

示,抗饱和攻击能力可以概括为:应对敌方饱和攻击时的抗打击能力,以短时间内拦截对方导弹数量或其它攻击武器数量为指标,是衡量防空系统性能的主要指标。

6.1 影响抗饱和能力的主要因素

舰艇编队的抗饱和攻击能力受制于多方因素,例如目标类型、火力通道、射击目标的平均时间、目标在发射区的逗留时间以及武器系统的工作可靠性、导弹的供应保障以及射击指挥等人为因素的影响。本题中可能影响编队抗饱和能力的因素有:

(1) 火力通道。火力通道数越多,武器系统的抗饱和攻击能力就越强。火力通道数是决定防空导弹抗饱和攻击能力的重要因素。

(2) 射击目标的平均时间。射击目标的平均时间越短,其抗饱和攻击能力就越强。

(3) 目标在发射区的逗留时间。作战空域越大,目标在发射区的逗留时间就越长,其受到射击的机会就越多,武器系统的抗饱和攻击能力就越强,目标在发射区的逗留时间还与目标特性(速度、高度和航路捷径等)有关。

6.2 危险方向的分析

根据题意,问题二要求根据问题的编队队形,仅使用防空导弹拦截来袭导弹的抗饱和攻击能力。对于一种编队,各个方向的防御能力无法达到完全一致,总会存在一个或多个防御能力最弱的方向,称之为危险方向。因此要求编队的抗饱和攻击能力,只需要求出最危险方向上的抗饱和攻击能力。

根据问题的求解的最佳队形,原先防御能力薄弱的两护卫舰间的区域已经得到巩固,相邻两艘护卫舰间的区域至少在三艘舰艇的射程防卫内,如图 6-1 的虚线区域,为 A、B 两艘护卫舰之间的区域。而边界区域(如图 6-1 中护卫舰 A 与 20 度边界的相交的区域)距舰艇 20km 至 30km 的区域,雷达并不能每次都准确探测到来袭导弹,并且边界方向距驱逐舰较远的位置,只有驱逐舰和护卫舰本身的防空导弹在射程区,若是有多批导弹来袭,将成为整个舰队的防御短板。由于整个舰队是一个对称结构,220 度的边界情形与图中 20 度的边界情形相同。由此分析,边界线的方向是整个舰队防御区最危险的方向。

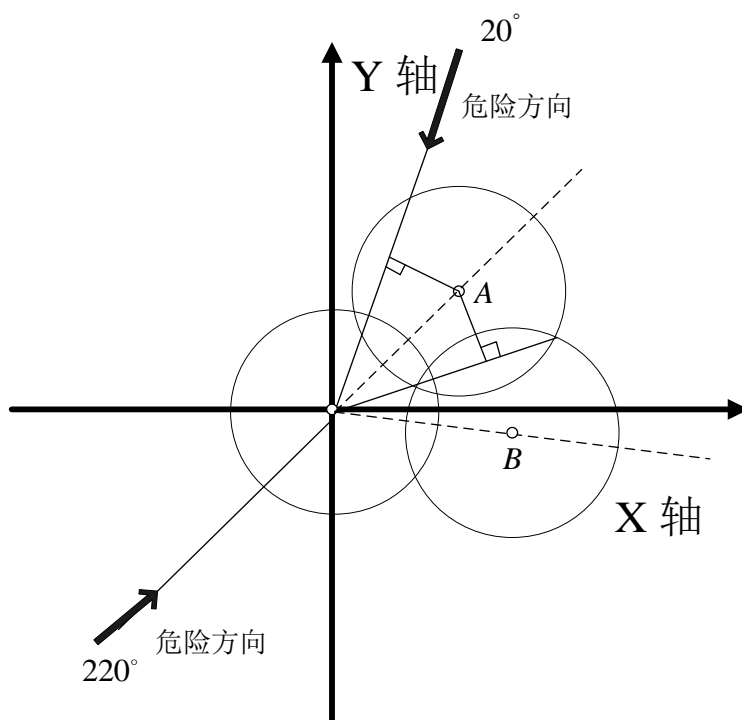


图 6-1：危险方向分析图

6.3 有效探测范围的确定

根据题意，由于来袭导弹一般采用超低空飞行和地球曲率的原因，各舰发现来袭导弹的随机变量都服从随机分布，均匀分布的范围是导弹与舰艇之间距离在 20-30 千米。即当来袭导弹与舰艇之间的距离超过 30 千米时，舰艇是无法发现来袭导弹的，故当距离大于 30 千米时，发现来袭导弹的概率为 0；当来袭导弹与舰艇的距离在 20-30 千米之间时服从均匀分布，故距离在 20-30 千米的任意一个位置发现来袭导弹的概率均为 $\frac{1}{10}$ ；当来袭导弹距离舰艇的距离小于 20 千米时，一定能够发现来袭导弹的，故当距离小于 20 千米时，发现来袭导弹的概率为 1。综上所述可知舰艇发现来袭导弹的概率为：

设来袭导弹与护卫舰之间的距离为 d

$$P = \begin{cases} 0 & d \geq 30 \\ \frac{1}{10} & 20 < d < 30 \\ 1 & d \leq 20 \end{cases}$$

在 20-30 千米如果考虑每个点发现来袭导弹的概率太小，也不容易计算，故本文中采取距离概率的期望作为雷达可以探测来袭导弹的有效范围：

$$E(P) = \int_{20}^{30} \frac{30-x}{10} dx$$

将数据带入，求得期望值为 25，因此舰艇雷达探测的有效范围为 25 千米，如图 6-2 所示。

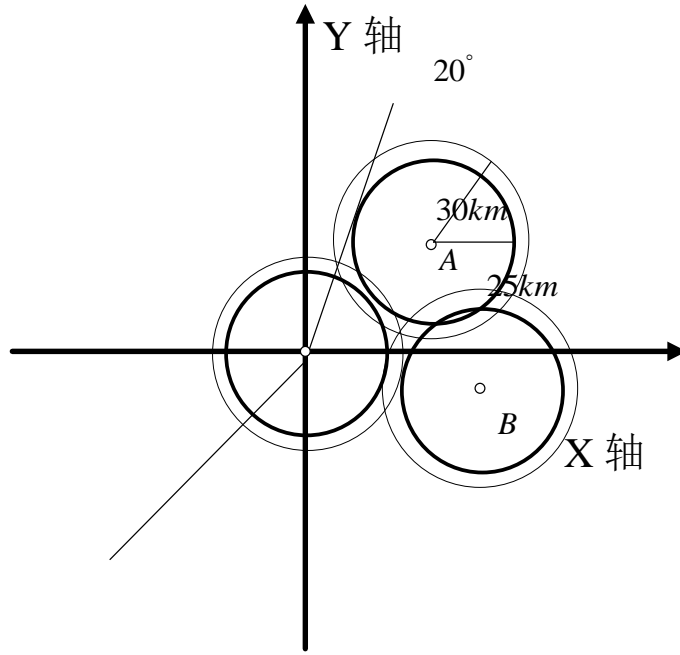


图 6-2: 雷达有效探测区

6.4 模型的建立

6.4.1 符号定义与基本描述

护卫舰与指挥舰的距离记为 r ，编队各舰上防空导弹的最小射程记为 L_0 ，最大射程记为 L_1 ，编队各舰上防空导弹的速度为 v_0 ，来袭导弹的速度为 v_1 。

由上述分析可知与 20 度角与 220 度角的边界方向为最危险方向，由于编队队形为对称结构，20 度角与 220 度角的情况完全一致，故下面以 20 度角的方向为例，考虑指挥舰和 4 个护卫舰分别能够拦截的导弹批次进行分析。

按照上述题意可知，能够发现来袭导弹距离指挥舰的位置为：

$$U = [0, E(P)] \cup \left[r \cos(\theta_1 - \theta_0) - \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}, r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} \right]$$

当来袭导弹向着指挥舰的位置打过来时，第一次被发现的位置在距离指挥舰 $r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$ 位置处，从发现的位置起，记时间为 0，反应时间为 7 秒。

6.4.2 拦截批次模型

(1) 指挥舰能够拦截的批次

设指挥舰第一次拦截到来袭导弹的时间为 t_1 秒，满足的关系式为：

$$v_1 \cdot (t_1 + 7) + v_2 \cdot t_2 = r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$$

则 t_1 秒后来袭导弹距离指挥舰的位置 S_1 为：

$$S_1 = r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} - v_1 \cdot (t_1 + 7)$$

假设在第 k 次拦截时的时间为 t_k ，距离指挥舰的位置为 S_k ，其中

$$S_k = r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} - v_1 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} (t_i + 7)$$

t_k 满足的关系式为:

$$v_1 \cdot (t_k + 7) + v_2 \cdot t_k = r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} - S_{k-1}$$

当距离指挥舰的距离小于 L_0 千米时, 容易造成误伤, 则假设当 $S_n > L_0$ 且 $S_{n+1} \leq L_0$ 时, 指挥舰能够拦截的批次 *Number* 为 n 。

综合上述分析, 建立的指挥舰拦截批次模型为:

$$\begin{aligned} \text{Number} &= \arg \max (S_n < L_0) \\ \text{其中} \begin{cases} S_k = r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} - v_1 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} (t_i + 7) \\ S_n > L_0 \\ S_{n+1} \leq L_0 \end{cases} \end{aligned}$$

(2) 护卫舰 A 能够拦截的批次

假设拦截来袭导弹的批数为 p 。设第一次护卫舰 A 拦截到来袭导弹的时间为 t_1 秒, 满足的关系式为:

$$\left| \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} - v_1 * (t_1 + 7) \right| = \sqrt{v_0^2 t_1^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$$

则 t_1 秒后距离指挥舰的位置 S_1 为:

$$S_1 = r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} - v_1 * (t_1 + 7)$$

若 $S_1 \in U$, 则继续下一步计算, 假设在第 k 次拦截时的时间为 t_k , 距离指挥舰的位置为 S_k , 若 $S_k > r \cos(\theta_1 - \theta_0)$, 且 $S_{k+1} < r \cos(\theta_1 - \theta_0)$, 则第 i 次截时间 t_i 满足的公式为:

$$\left| \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} - S_{i-1} - v_1 * (t_i + 7) \right| = \sqrt{v_0^2 t_i^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$$

其中 $1 < i \leq k$ 。

第 j 次截时间 t_j 满足的公式为:

$$\left| v_1 * (t_j + 7) - \left(S_j - \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} \right) \right| = \sqrt{v_0^2 t_j^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$$

其中 $k < j \leq p$ 。

如果在第 m 次拦截来袭导弹的位置距离指挥舰的位置不在能够发现来袭导弹的范围内, 则下一次发现来袭导弹的位置为 $E(P)$, 即当

$E(P) < S_m < r \cos(\theta_1 - \theta_0) - \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$ 时, 第 $m+1$ 次拦截来袭导弹被发现的位置为 $E(P)$, 则第 $m+1$ 次拦截的时间 t_{m+1} 满足的公式为:

$$\left| r \cos(\theta_1 - \theta_0) - E(P) + v_1 * (t_m + 7) \right| = \sqrt{v_0^2 t_m^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$$

第 n 次截时间 t_n 满足的公式为:

$$\left| r \cos(\theta_1 - \theta_0) - E(P) + v_1 \cdot \sum_{l=m+1}^n (t_l + 7) \right| = \sqrt{v_0^2 t_n^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$$

如果来袭导弹是在距离指挥舰或者护卫舰 L_0 千米的距离内拦截成功，则有可能造成误伤，故当经过 $p+1$ 次拦截后，若 $S_{p+1} \leq L_0$ 且 $S_p > L_0$ ，则该护卫舰不能再拦截来袭导弹，拦截来袭导弹的批数为 p 。

综合上述分析，建立的护卫舰拦截批次模型为：

$$\begin{aligned}
 &Number = \arg \max (S_n < L_0) \\
 &\text{其中} \begin{cases} S_k = r \cos(\theta_1 - \theta_0) + \sqrt{E(P)^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)} - v_1 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} (t_i + 7) \\ S_p > L_0 \\ S_{p+1} \leq L_0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

护卫舰对该方向的导弹能够拦截的批次满足的条件同上，只有角度有所区别，且要考虑护卫舰上的防空导弹射程。

6.5 模型的求解

根据建立的模型，代人相关数值进行计算，得到边界方向最多能抵御 10 批来袭导弹，即当多于 10 批次的导弹对边界方向进行袭击时，仅使用防空导弹进行防御，编队的防御系统就会崩溃，必须采取其他火力通道进行配合。

如表 6-1，以下是编队 9 次防空拦截（即防空导弹与来袭导弹相遇）的时间点与相应拦截点距指挥舰的距离。由于各个舰艇的位置和射程限制，各舰艇对 20 度方向来袭的导弹拦截的次数各不相同。其中，指挥舰可以进行 3 次拦截，护卫舰 A 可以进行 3 次拦截，护卫舰 B 可以进行 2 次拦截，护卫舰 C 和 D 只能进行一次拦截，而护卫舰 D 由于射程限制，无法对 20 度边界来袭的导弹进行拦截。

表 6-1：编队危险区拦截抗饱和攻击计算表

舰艇	时间（秒）	距指挥舰的距离（千米）
护卫舰 A	32.297	48.0065
指挥舰	56.68	40.5406
护卫舰 A	32.1830	38.1585
护卫舰 B	63.33	36.3656
指挥舰	36.1322	27.3418
护卫舰 A	38.8672	26.2651
指挥舰 D	105.39	25.63716
指挥舰	27.37	18.9727
护卫舰 B	62.315	16.9912
护卫舰 C	90	16.0856
指挥舰	19.9	12.8827

注：时间的计算起点从雷达可探测到来袭导弹的时刻算起，即距指挥舰 25 千米处。

6.6 结果分析

指挥舰第一次拦截来袭导弹经过了 56.68 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 40.5406 千米；第二次拦截来袭导弹经过了 36.1322 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 27.3427 千米；第三次拦截来袭导弹经过了 27.37 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 18.9727

千米；第四次拦截来袭导弹经过了 19.9 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 12.8827 千米；因距离指挥舰的位置大于 10 千米，故考虑准备拦截第五批导弹，经过计算，在经过 14.48 秒后，指挥舰可以成功拦截来袭导弹，但是来袭导弹与指挥舰的距离为 8.4527 千米，因为当距离小于 10 千米时，发射导弹容易误伤，故在来袭导弹距离指挥舰小于 10 千米时是不能拦截的，故取消第五次拦截。指挥舰能够拦截的次数为 4 次。因来袭导弹与指挥舰的距离不断减小，在速度不变的情况下，时间会逐渐减小，是符合常理的。

护卫舰 A 第一次拦截来袭导弹经过了 32.297 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 48.0065；第二次拦截来袭导弹经过了 32.1830 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 38.1585 千米；第三次拦截来袭导弹经过了 38.8672 秒，来袭导弹距离指挥舰的距离为 26.2651 千米，此时来袭导弹不在舰艇的发现范围内，故来袭导弹在距离指挥舰 25 千米时再次被发现，此时经过 56.6287 秒，来袭导弹距离指挥舰的距离为 7.68，同样小于 10 千米，故取消第四次拦截，护卫舰 A 能够拦截的总次数为 3 次。因来袭导弹与指挥舰的距离不断减小，在速度不变的情况下，时间会逐渐减小，是符合常理的。

护卫舰 B 第一次拦截来袭导弹经过了 63.33 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 36.3656；第二次拦截来袭导弹经过了 62.315 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 16.9912 千米；第三次准备拦截来袭导弹经过了 66 秒，此时来袭导弹已经越过指挥舰 3.2048 千米，在距离指挥舰小于 10 千米的范围内，故取消第三次拦截，护卫舰 B 能够拦截的总次数为 2 次。因来袭导弹与指挥舰的距离不断减小，在速度不变的情况下，时间会逐渐减小，是符合常理的。

护卫舰 C 第一次拦截来袭导弹经过了 90 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 16.08560167；护卫舰 C 能够拦截的总次数为 1 次。因来袭导弹与指挥舰的距离不断减小，在速度不变的情况下，时间会逐渐减小，是符合常理的。

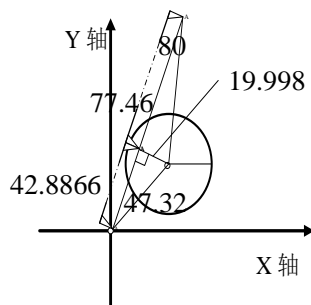
护卫舰 D 第一次拦截来袭导弹经过了 105.39 秒，来袭导弹与指挥舰的距离为 25.63716；护卫舰 C 能够拦截的总次数为 1 次。因来袭导弹与指挥舰的距离不断减小，在速度不变的情况下，时间会逐渐减小，是符合常理的。

7. 问题三的求解

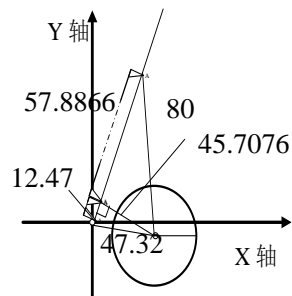
由于舰艇上的雷达受到地球曲度限制，对低高度目标搜索距离有限，同时由于受水面干扰导致搜索效果受限。因此水上作战时，通常需要空中预警机进行协助，扩大搜索范围。预警机是将整套雷达系统放置在飞机上，借由飞行高度，自空中搜索各类空中、海上或者是陆上目标，提供较佳的预警与搜索效果，延长容许反应的时间与弹性。

7.1 最远拦截距离分析

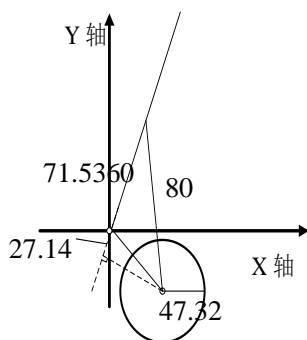
由于受到空中预警机的支援，雷达探测的范围扩大，可在更远距离的范围对来袭导弹进行拦截。空中预警机的探测距离为 200 千米，超过了编队的防空导弹射程，因此限制编队抗饱和攻击能力的因素就是射程因素。由于来袭导弹是以指挥舰为目标，沿 20 度角的方向飞来，根据根据指挥舰的射程，指挥舰拦截来袭导弹的最远距离为 80 千米。以下将对四艘护卫舰的最远拦截距离进行分析。



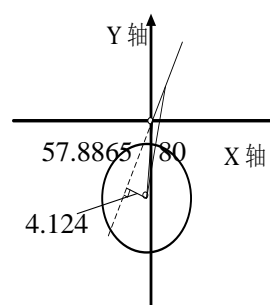
(e) 护航舰 A 与指挥舰的几何关系



(f) 护航舰 B 与指挥舰的几何关系



(g) 护航舰 C 与指挥舰的几何关系



(h) 护航舰 D 与指挥舰的几何关系

图 7-1 四艘护卫舰最远拦截距离

由图 7-1，对各护卫舰独立进行的几何关系分析可知，对于 20 度方向的来袭导弹，指挥舰与护卫舰 A、B、C、D 均能进行拦截，由于可拦截的极限距离不一样，因此各舰的拦截次数不一样。

7.2 模型的建立

7.2.1 符号定义

护卫舰与指挥舰的距离 r ，编队各舰上防空导弹的最小射程记为 L_0 ，最大射程记为 L_1 ，编队各舰上防空导弹的速度为 v_0 ，来袭导弹的速度为 v_1 。

编队得到空中预警机的信息支援，对距离指挥舰 200 千米内的所有来袭导弹都能可以准确预警，即编队可以发现来袭导弹的距离为以 5 个舰艇为圆心，200 千米为半径的圆的交集。但是由于防空导弹有最大射程，故每一个舰艇都可以在防空导弹最大射程的位置处实现第一次拦截。

分析可知与 20 度角相交的直线为最危险方向，故下面考虑指挥舰和 4 个护卫舰分别能够拦截的导弹批次进行分析：

(1) 指挥舰拦截的批次

指挥舰第一次拦截到来袭导弹的位置为距离指挥舰 L_1 千米的位置处，即 $S_1 = L_1$ ，记第一次拦截导弹的时间 $t_1 = 0$ 。

假设在第 k 次拦截时的时间为 t_k ，距离指挥舰的位置为 S_k ，其中

$$S_k = L_1 - v_1 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} (t_i + 7)$$

则 t_k 满足的关系式为：

$$v_1 \cdot (t_k + 7) + v_2 \cdot t_k = L_1 - S_{k-1}$$

其中 $1 < k \leq n$

当距离指挥舰的距离小于 L_0 千米时，容易造成误伤，则假设当 $S_n > L_0$ 且 $S_{n+1} < L_0$ 时，指挥舰能够拦截的批次 *Number* 为 n 。

综合上述分析，建立的指挥舰拦截批次模型为：

$$\begin{aligned} \text{Number} &= \arg \max (S_n < L_0) \\ \text{其中} \begin{cases} S_1 = L_1 \\ t_1 = 0 \\ S_k = L_1 - v_1 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} (t_i + 7), 1 < k \leq n \\ S_n > L_0 \\ S_{n+1} \leq L_0 \end{cases} \end{aligned}$$

(2) 护卫舰 A 拦截的批次

假设拦截来袭导弹的批数为 p 。设第一次护卫舰 A 拦截到来袭导弹的位置为距离护卫舰 A L_1 千米的位置处，即 $S_1 = L_1$ ，记第一次拦截导弹的时间 $t_1 = 0$ 。

假设在第 k 次拦截时的时间为 t_k ，距离指挥舰的位置为 S_k ，若 $S_k > r \cos(\theta_1 - \theta_0)$ ，且 $S_{k+1} < r \cos(\theta_1 - \theta_0)$ ，则第 i 次截时间 t_i 满足的公式为：

$$\left| \sqrt{L_1^2 - r^2 \cos^2(\theta_1 - \theta_0)} - S_{i-1} - v_1 \cdot (t_i + 7) \right| = \sqrt{v_0^2 t_i^2 - r^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_0)}$$

其中 $1 < i \leq k$ ，则 $S_k = L_1 - v_1 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} (t_i + 7)$ 。

第 j 次截时间 t_j 满足的公式为：

$$\left| v_1 * (t_j + 7) - \left(S_{j-1} - \sqrt{L_1^2 - r^2 \cos^2 (\theta_1 - \theta_0)} \right) \right| = \sqrt{v_0^2 t_j^2 - r^2 \sin^2 (\theta_1 - \theta_0)}$$

其中 $k < j \leq p$ 。

如果来袭导弹是在距离指挥舰或者护卫舰 L_0 千米的距离内拦截成功，则有可能造成误伤，故当经过 $p+1$ 次拦截后，若 $S_{p+1} \leq L_0$ 且 $S_p > L_0$ ，则该护卫舰不能再拦截来袭导弹，拦截来袭导弹的批数为 p 。
综合上述分析，建立的护卫舰拦截批次模型为：

$$\begin{aligned} &Number = \arg \max (S_n < L_0) \\ &\text{其中} \begin{cases} S_1 = L_1 \\ t_1 = 0 \\ S_k = L_1 - v_1 \cdot \sum_{i=1}^{k-1} (t_i + 7), \quad 1 < k \leq n \\ S_n > L_0 \\ S_{n+1} \leq L_0 \end{cases} \end{aligned}$$

对于其他护卫舰，在 20 度方向上，能够拦截导弹的批次满足的条件同上，只有角度有所区别，且要考虑护卫舰上的防空导弹射程，因此不一一进行列举。

7.3 模型的求解与分析

根据建立的模型，代入相关数值进行计算，得到边界方向最多能抵御 21 批来袭导弹，比第二问中，没有预警机情况下，防御能力提升 2.1 倍。如表 7-1，以下是编队 21 批防空拦截（即防空导弹与来袭导弹相遇）的时间点与相应拦截点距指挥舰的距离。由于各个舰艇的位置和射程限制，各舰艇对 20 度方向来袭的导弹拦截的次数各不相同。其中，指挥舰可以进行 6 次拦截，护卫舰 A 可以进行 8 次拦截，护卫舰 B 可以进行 4 次拦截，护卫舰 C 能进行 2 次拦截，而护卫舰 D 由于射程限制，只能进行一次拦截。

表 7-1：拦截来袭导弹总批次的时刻与距离表

舰艇	时间（秒）	距指挥舰的距离（千米）
指挥舰	0.0000	80.0000
指挥舰	76.3900	56.6240
指挥舰	109.7964	39.6240
指挥舰	143.2028	27.2640
指挥舰	165.5893	18.2740
指挥舰	179.9633	11.7340
护卫舰 A	0.0000	120.3466
护卫舰 A	77.3340	96.6824
护卫舰 A	127.9340	79.0568
护卫舰 A	164.9940	65.5744

护卫舰 A	187.1110	56.6646
护卫舰 A	212.1010	46.8757
护卫舰 A	238.6986	36.5957
护卫舰 A	272.2486	24.1870
护卫舰 B	0.0000	77.9038
护卫舰 B	81.1800	53.0627
护卫舰 B	142.2800	32.2241
护卫舰 B	198.2800	12.9461
护卫舰 C	79.5900	20.0415
护卫舰 C	0	44.396
护卫舰 D	0	32.7537

注：编队拦截导弹的时刻没有公共的起点时刻，均以相距各舰艇 80 千米处为 0 时刻，各舰艇的拦截时间是相互独立的。

7.4 结果分析

指挥舰在 80 千米的时候拦截第一批导弹，在成功拦截六批来袭导弹后，在第七次拦截时是在距离指挥舰 6.9733 千米处。指挥舰能够拦截的次数为 6 次，相较于问题二中的提高了 1.5 倍。

护卫舰 A 在 80 千米的时候拦截第一批导弹，在成功拦截八批来袭导弹后，在第九次拦截时是在距离指挥舰 8.467394 千米处。指挥舰能够拦截的次数为 7 次，相较于问题二中的提高了 2.3 倍。

护卫舰 B 在 80 千米的时候拦截第一批导弹，在成功拦截四批来袭导弹后，在第四次拦截时是在越过指挥舰 7.88288 千米处。指挥舰能够拦截的次数为 3 次，相较于问题二中的提高了 2 倍。

护卫舰 C 在 80 千米的时候拦截第一批导弹，在成功拦截两批来袭导弹后，在第四次拦截时是在距离指挥舰 0.849427 千米处。指挥舰能够拦截的次数为 2 次，相较于问题二中的提高了 2 倍。

护卫舰 D 在 80 千米的时候拦截第一批导弹，在成功拦截一批来袭导弹后，在第二次拦截时是在越过指挥舰 9.36612 千米处。指挥舰能够拦截的次数为 1 次，相较于问题二中的提高了 1 倍。

预警机的信息支援让抗饱和攻击能力从能够拦截 11 批次到 21 批次，提高了 1.91 倍。预警机的信息支援让抗饱和能力增加不少。

8. 问题四的解答

空中目标作战企图识别是现代防空作战指挥中重要的步骤,它直接影响到指挥员的指挥决策。本题要求根据提供的空中目标信息,判断目标可能的意图,为威胁判断、火力分配和抗击来袭目标奠定基础。本文运用支持向量机建立了最小二乘支持向量机模型,分析探讨空中目标作战企图的识别。

8.1 数据的计算

题中表 2 给出 6 个可以判别空中意图的指标,而对于要求的 12 批可疑空中目标只给出了时间、飞行高度与经纬度,因此需要根据已知数据对剩余的距离、水平速度、方位角以及航向角进行求解。

(1) 距离计算:

地球是一个近乎标准的椭球体,它的赤道半径为 6378.140 千米,极半径为 6356.755 千米,平均半径 6371.004 千米。如果我们假设地球是一个完美的球体,那么它的半径就是地球的平均半径,记为 R 。如果以 0 度经线为基准,那么根据地球表面任意两点的经纬度就可以计算出这两点间的地表距离(这里忽略地球表面地形对计算带来的误差,仅仅是理论上的估算值)。设第一点 A 的经纬度为 $(LonA, LatA)$, 第二点 B 的经纬度为 $(LonB, LatB)$, 按照 0 度经线的基准,东经取经度的正值(Longitude),西经取经度负值($-Longitude$),北纬取 90-纬度值($90-Latitude$),南纬取 90+纬度值($90+Latitude$),则经过上述处理过后的两点被计为 $(MLonA, MLatA)$ 和 $(MLonB, MLatB)$ 。那么根据三角推导,可以得到计算两点距离的如下公式:

$$C = \sin(MLatA) \cdot \sin(MLatB) \cdot \cos(MLonA - MLonB) + \cos(MLatA) \cdot \cos(MLatB)$$

$$Distance = R \cdot \arccos(C) \cdot \pi / 180$$

(2) 方位角计算:

由题可知方位角 β 是从我指挥舰到空中目标方向的方位角:正北时 $\beta = 0$,建立以经纬度坐标系,设指挥舰在点 $P_0(LonP_0, LatP_0)$ 处,点 $P_1(LonP_1, LatP_1)$ 为空中目标的位置,方位角 β 是从我指挥舰到空中目标方向的方位角:正北时 $\beta = 0$,故空中目标的位置不同,方位角的计算也有所不同。 $d_{P_0P_1}$ 为空中目标与指挥舰的距离。

当 $LonP_0 > LonP_1$, 并且 $LatP_1 > LatP_0$ 时,方位角为

$$360 - \arcsin\left(\frac{LonP_0 - LonP_1}{d_{P_0P_1}}\right) * 180 / \pi$$

当 $LonP_0 > LonP_1$, 并且 $LatP_1 < LatP_0$ 时,方位角为

$$180 + \arcsin\left(\frac{LonP_0 - LonP_1}{d_{P_0P_1}}\right) * 180 / \pi$$

当 $LonP_0 < LonP_1$, 并且 $LatP_1 < LatP_0$ 时,方位角为

$$180 - \arcsin\left(\frac{LonP_0 - LonP_1}{d_{P_0P_1}}\right) * 180 / \pi$$

当 $LonP_0 < LonP_1$, 并且 $LatP_1 > LatP_0$ 时,方位角为

$$\arcsin\left(\frac{LonP_0 - LonP_1}{d_{P_0P_1}}\right) * 180 / \pi$$

(3) 水平速度计算:

设空中目标 P 在时刻 t 的经纬度为 $(LonP_t, LatP_t)$ ，下一时刻 $t1$ 的经纬度为 $(LonP_{t1}, LatP_{t1})$ ，空中目标 P 的水平位移为 d_p ，由距离计算的公式得出，则水平速度 v_p 为

$$v_p = \frac{d_p}{t1 - t}$$

(4) 航向角计算:

航向角指的是空中目标飞行的方向，在 t 时刻的航向角，即是空中目标从 t 时刻指向 $t+1$ 时刻的方向（即与正北的夹角），即是 t 时刻的指挥舰指向空中目标 $t+1$ 时刻的方位角。计算方法同方位角的计算。

根据上述公式，利用 matlab 软件进行求解，得到的结果如表 6-1（详情见附件）所示：

表 6-1：空中目标各状态计算值

目标 ID	方位角(mil)	距离(km)	水平速度 m/s	航向角(度)
41006893	1521.2751	243.8201	212.3712	295.2763
41006893	1520.8377	243.6372	212.3713	295.2762
41006893	1520.3997	243.4542	212.3713	295.2762
41006893	1519.9611	243.2714	212.3712	295.2761
41006893	1519.5218	243.0885	170.3157	295.2758
41006893	1518.8158	242.7954	296.4825	295.2759
41006893	1518.1999	242.5404	212.3713	295.2757
...
41006891	760.5518	226.2603	157.4341	156.1773
41006891	761.8387	226.1258	271.6245	156.1775
41006891	762.9499	226.01	195.4976	156.1778

8.2 最小二乘支持向量机

支持向量机主要是基于如下思想：通过事先选择的非线性映射将输入向量映射到高维特征空间，在这个空间中构造最优决策函数。在构造最优决策函数时，利用了结构风险最小化原则。并巧妙的利用原空间的核函数取代了高维的特征空间中的点积运算。

概括地说，支持向量机就是通过用内积函数定义的非线性变换输入空间变换到一个高维空间，在这个空间中求最优分类面。

8.2.1 最小二乘支持向量机模型的建立

设样本为 n 维向量，某区域的 1 个样本及其值表示为

$$(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l) \in R^n \times R$$

首先用一非线性映射 $\Psi(x)$ 把样本从原空间 R^n 映射到特征空间 $\Psi(x) = (\varphi(x_1), \varphi(x_2), \dots, \varphi(x_l))$ 。在这个高维特征空间中构造最优决策函数 $y(x) = w\varphi(x) + b$ 。这样非线性估计函数转化为高维特征空间中的线性估计函数。利用结构风险最小化原则，寻找 w, b 就是最小化

$$R = \frac{1}{2} \|w\|^2 + cR_{emp}$$

其中 $\|w\|^2$ 控制模型的复杂度， c 为正规化参数。 R_{emp} 为误差控制函数，也即 ε 不敏感损失函数。损失函数为 *humber* 损失函数。最小二乘支持向量机在优化目标的损失函数为误差 ξ_i 的二次项。故优化问题为：

$$\text{目标函数为：} \min J(w, \xi) = \frac{1}{2} w \cdot w + c \sum_{i=1}^l \xi_i^2$$

$$\text{约束条件为 } y_i = \varphi(x_i) \cdot w + b + \xi_i, i = 1, \dots, l.$$

综上可知最小二乘支持向量机的模型为：

$$\begin{aligned} \min J(w, \xi) &= \frac{1}{2} w \cdot w + c \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \\ \begin{cases} y_i = \varphi(x_i) \cdot w + b + \xi_i \\ i = 1, \dots, l \end{cases} \end{aligned}$$

8.2.2 最小二乘支持向量机模型的求解

用拉格朗日法求解这个优化问题

构造拉格朗日函数：

$$L(w, b, \xi, a, \gamma) = \frac{1}{2} w \cdot w + c \sum_{i=1}^l \xi_i^2 - \sum_{i=1}^l a_i (w \cdot \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i)$$

其中 $a_i, i = 1, \dots, l$ 是拉格朗日乘子

根据优化 $\frac{\partial L}{\partial w} = 0, \frac{\partial L}{\partial b} = 0, \frac{\partial L}{\partial \xi} = 0, \frac{\partial L}{\partial a} = 0$ 条件可得：

即可得：

$$\begin{aligned} w &= \sum_{i=1}^l a_i \varphi(x_i), \quad \sum_{i=1}^l a_i = 0, \quad a_i = c\xi_i, \\ w \cdot \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i &= 0 \quad (1) \end{aligned}$$

定义核函数 $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i) \varphi(x_j)$ ， $K(x_i, x_j)$ 是满足 *Mercer* 条件的对称函数。根据 (1)，优化问题转化为求解线性方程：

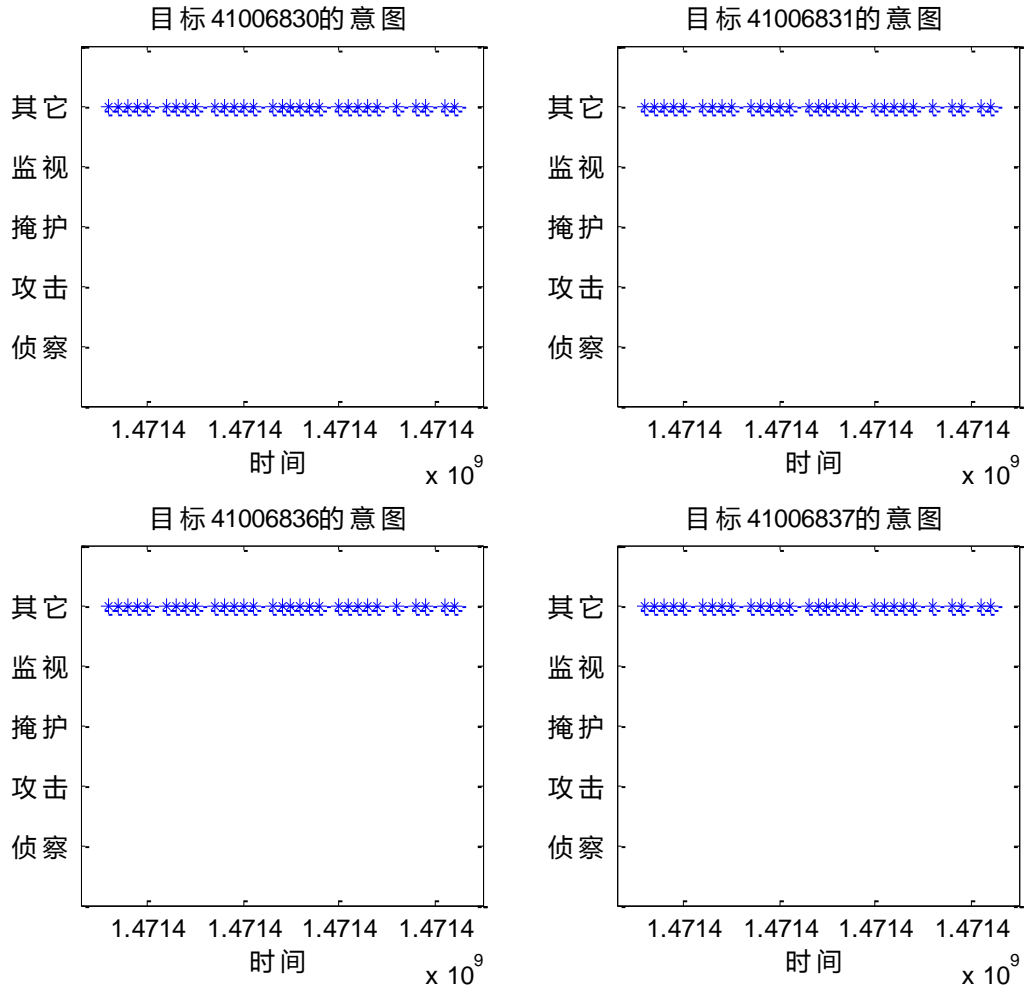
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & K(x_i, x_j) + 1/c & \cdots & K(x_i, x_j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & K(x_i, x_j) & \cdots & K(x_i, x_j) + 1/c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a_1 \\ \vdots \\ a_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_l \end{bmatrix}$$

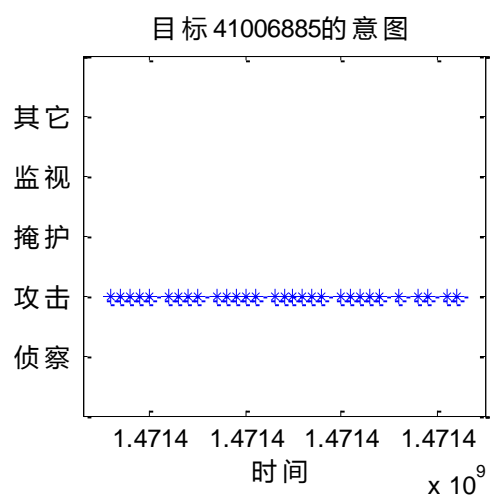
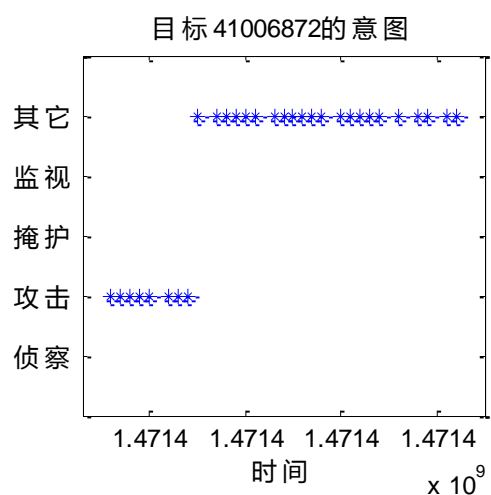
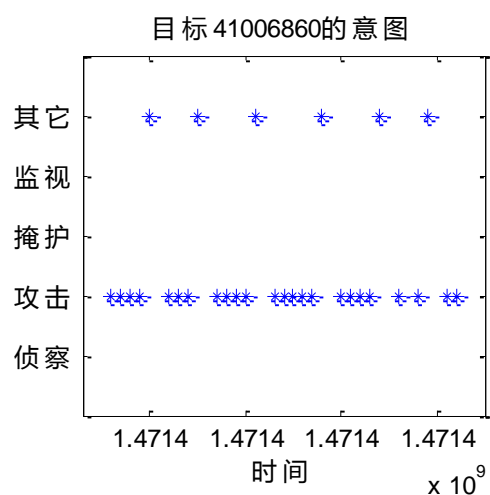
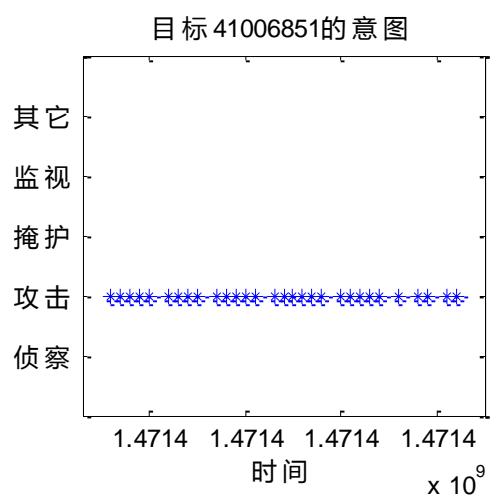
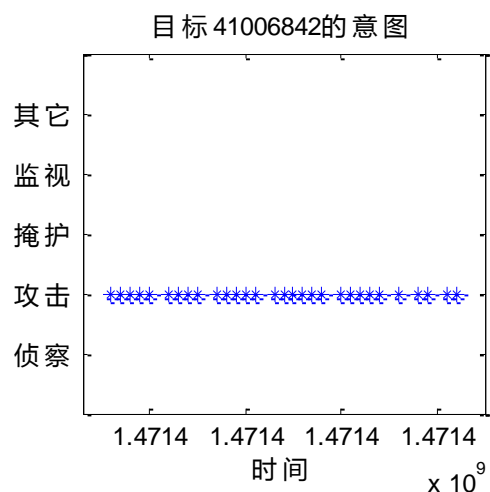
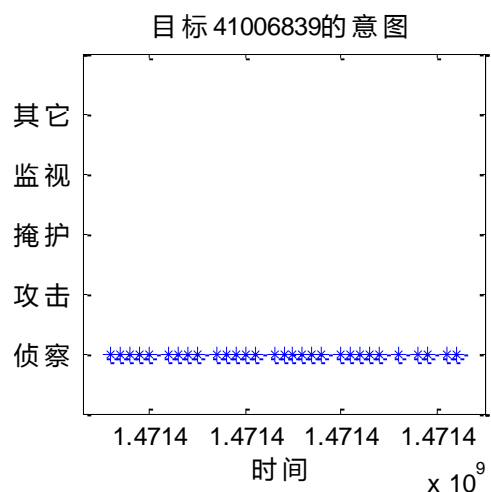
最后得到非线性方程：

$$f(x) = \sum_{i=1}^l a_i K(x_i, x_j) + b$$

8.2.3 模型的求解与分析

由于支持向量机是一种机器学习方法，需要对样本数据进行训练，产生记忆，才能对实验数据进行运算。将已知的表 2 数据输入模型中进行训练。通常训练完成后还需要进行检验，但是本题中样本数据过少，要的种类样本只有一个数据，故在此不做检验分析，直接带入实验数据进行运算，得出的结果，如图 8-1 所示：





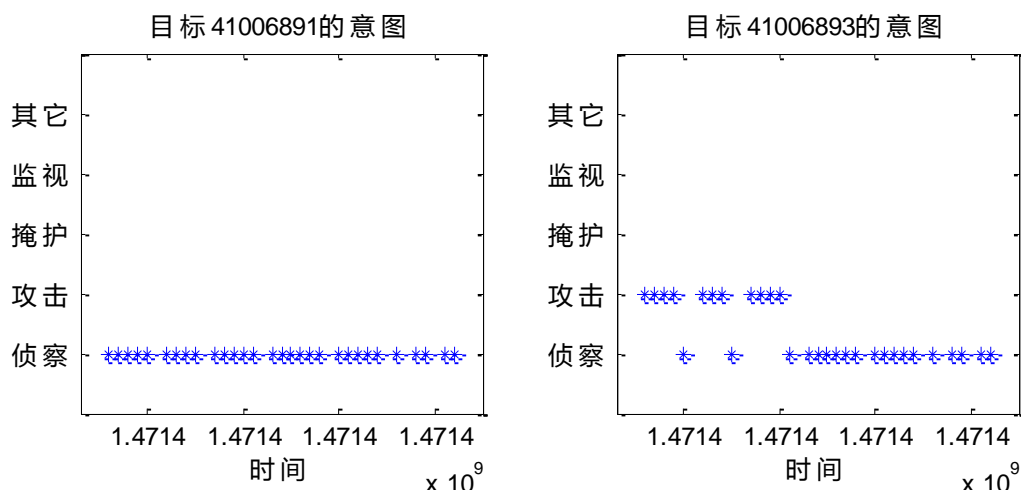
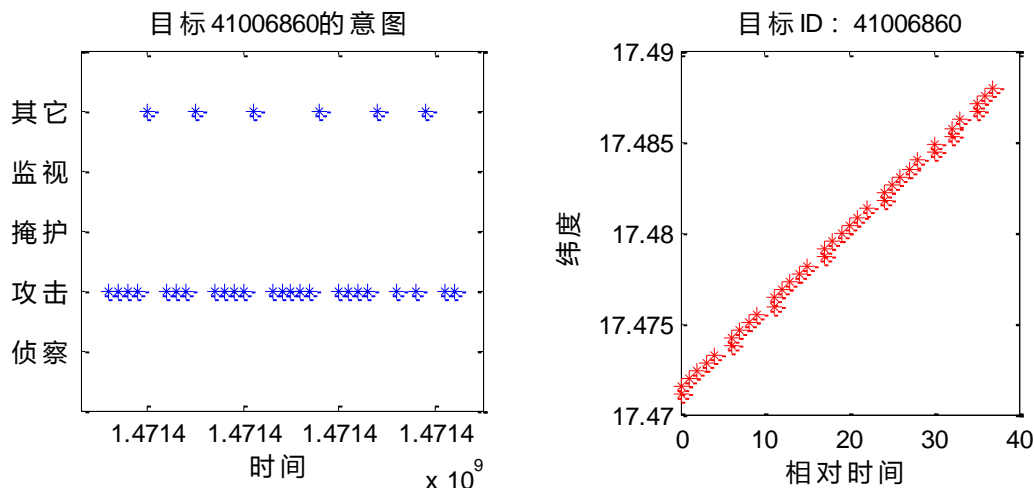


图 8-1: 空中目标意图识别图

图 8-1 结果显示，根据建立的模型，12 批空中目标有 9 批目标是可以直接分析出意图，不存在意图混淆情况，而剩下的 3 批存在意图混淆情况。目标 41006860 与目标 41006872 既存在其他类别的特征，有存在攻击类别特征；目标 41006893 既存在攻击类别特征又存在侦查类别特征。将这三批目标的轨迹图与意图判别图进行比较，可以看出出现意图混淆的原因可能与他们突然的方向改变有关。如图 8-2，为目标 41006860、目标 41006872 与目标 41006893 的轨迹图与意图判别图的对比。



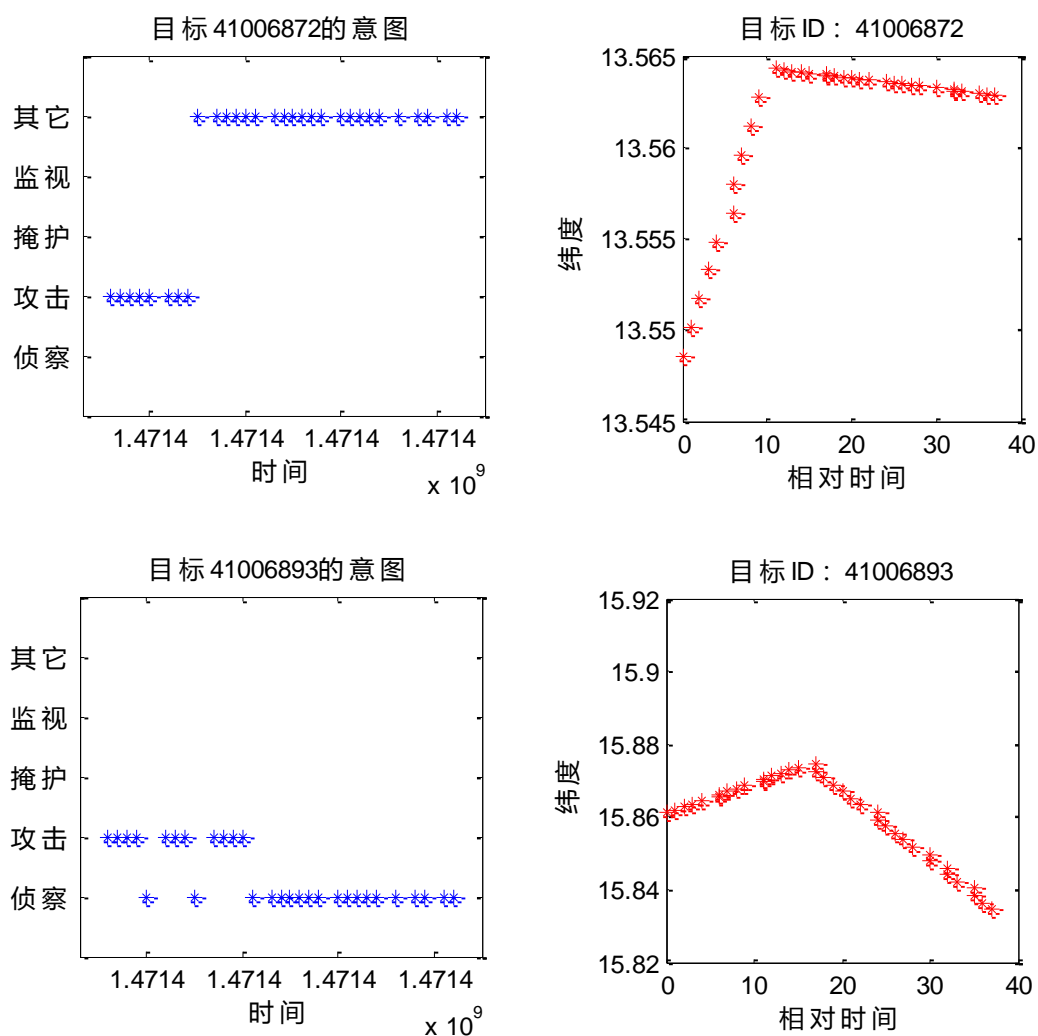


图 8-2 意图判别与轨迹对比图

如图 8-2，目标 41006860 出现意图混淆原因在于有个别位置较大的偏离趋势位置；目标 41006872 出现意图混淆与目标 41006893 出现意图混淆主要是由于出现了大幅度是变向，导致方位角出现较大差异。

9. 问题五的解答

在以信息化空袭为主要样式的信息化战争威胁日益加剧的今天，防空信息战客观地成为与之相对应的作战样式和捍卫国家空中安全的关键，防空信息战不仅是防空作战的先导，而且贯穿于国家平时和战时的整个方位过程。对国家的空中、空间安全与利益，具有极其重要的战略意义。因此，对防空信息战效能进行合理评估。正确运用防空信息战，是防空乃至整个战争成败的关键。

防空信息战效能是指在一定的作战背景条件下，参与防空信息战活动的装备、人员完成上级赋予的对空信息斗争任务能力的大小。因此，防空信息战系统是一个多因素的复杂系统，包含多种不确定因素。如数据匮乏、信息不明确、主观判断等定义不明确等。利用指数法。模拟法等方法对其进行效能评估比较麻烦。因此，本文采用基于 D-S 证据推理的评估方法。能够很好的表示“不确定性”及“无知”等重要概念。并具有无需先验概率、推理形式简单等优点。可以减少复杂系统中数据量化的困难。

9.1 防空信息战系统的指标体系

9.1.1 防空信息战系统的指标体系结构

防空信息战系统的指标体系结构为层次结构，如图所示。

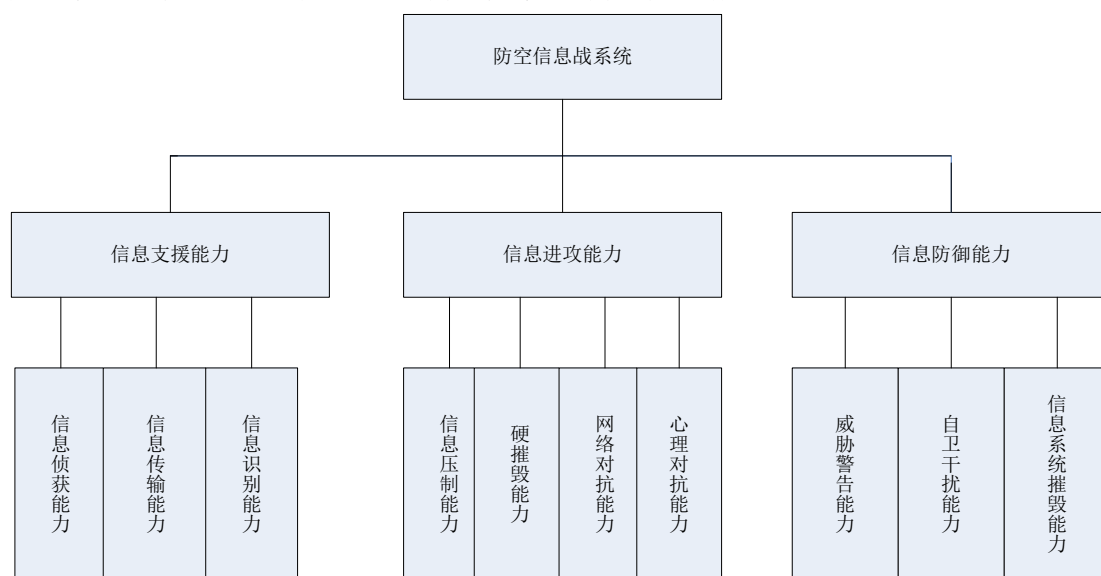


图 9-1：防空信息战系统的指标体系

9.1.2 防空信息系统的指标集

信息支援能力是指信息系统为体系信息进攻和信息防御行动提供情报信息的能力，主要包括信息的侦查获取能力、传输能力和处理能力。信息侦查获取能力是指对敌方信息有效地截获、侦查、利用的概率度量，取决于侦查技术人员的素质和情报信息探测系统的性能；信息传输能力主要由通信分系统的能力决定，包括信息的传输率、传输质量和传输的保密度；信息识别能力是以信息处理概率、信息处理密度和信息处理质量来衡量。

信息进攻能力是对敌方信息系统的干扰、破坏能力，是信息战的重要能力之一，其大小用对敌总体信息目标压制、欺骗和摧毁的概率即信息进攻量来衡量。

信息进攻能力分解为信息压制能力、硬摧毁能力、网络对抗能力和心理对抗能力。信息压制能力里，即通过电子干扰手段，污染、切断对方信息获取和信息传输渠道，干扰阻塞对方信息设备的能力；硬摧毁包括反辐射武器对电子设备的摧毁、以精确武器为主对信息系统设备的摧毁以及特种作战部队对信息系统中关键部位和设备的破坏等；网络对抗能力是指进入对方军事信息系统，窃取信息，同时通过网络直接向敌方信息系统注入病毒的能力；心理对抗能力主要是指对敌信息设备即信息战人员的欺骗能力。

信息防御能力是保护己方信息的完整和信息系统安全的能力，其大小用信息防御量来表示。信息系统警告能力是对敌信息攻击行动能及早发现，并进行警告；自卫干扰能力就是为保障信息设备正常工作，保障信息获取和传输渠道畅通，排除敌干扰并对敌信息设备进行干扰的能力；信息系统抗毁能力就是抗击敌方对信息系统实施病毒攻击或硬打击的能力。

9.2 证据合成法则

证据合成法则就是为了同时利用来自相互独立的信息源的 2 组(或多组)证据，提高对事件的置信程度而提出的一种多信息的组合法则。

9.2.1 两个信度函数的组合规则

设 Bel_1, Bel_2 是同一辨识框架 Θ 上的 2 个信度函数， m_1 和 m_2 分别是其对应的基本可信度分配，若 $A \subseteq \Theta$ 且 $m(A) > 0$ 则称 A 为焦元，焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_k 设：

$$\sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j) < 1$$

那么下式定义的函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 是基本可信度分配：

$$\begin{cases} m(A) = 0 & A = \emptyset \\ m(A) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j)} & A \neq \emptyset \end{cases}$$

9.2.2 多个信度函数的组合规则

设 Bel_1, \dots, Bel_n 是同一辨识框架 Θ 上的信度函数， m_1, \dots, m_n 分别是其对应的基本可信度分配。如果 $Bel_1 \oplus \dots \oplus Bel_n$ 存在且基本可信度分配为 m ，则 n 个信任函数的组合为

$$(((Bel_1 \oplus Bel_2) \oplus Bel_3) \oplus \dots) \oplus Bel_n$$

式中 \oplus 表示直和，由组合证据获得的最终证据与其次序无关。

9.3 基于云模型的定性评测法

9.3.1 基础理论：云的定义及其数字特征

设 U 是一个普通集合， $U = \{u\}$ ，称为论域，关于论域 U 中的模糊集合 A ，是指对于任意元素 u 都存在一个有稳定倾向的随机数 $\mu_A(u)$ ，称为 u 对 A 隶属度。

如果论域中元素是简单有序的，则 U 可以看作是基础变量，隶属度在 U 上的分布，称为（隶属）云；如果论域中的元素不是简单有序的，而根据某个法则， f 可将 U 映射到另一个有序的论域 U' 上， U' 中的一个且只有一个 u' 与 u 对应，则 U' 为基础变量，隶属度在 U' 上的分布称为（隶属）云。

由期望值 E_x 和熵 E_n 2 个数字特征便可确定具有正态分布形式的隶属云的期望曲线方程。它将模糊性和随机性完全集成到一起，构成定性和定量相互的映射，作为知识表示基础，建立了定性定量之间的转换模型，如图 9-1 所示。

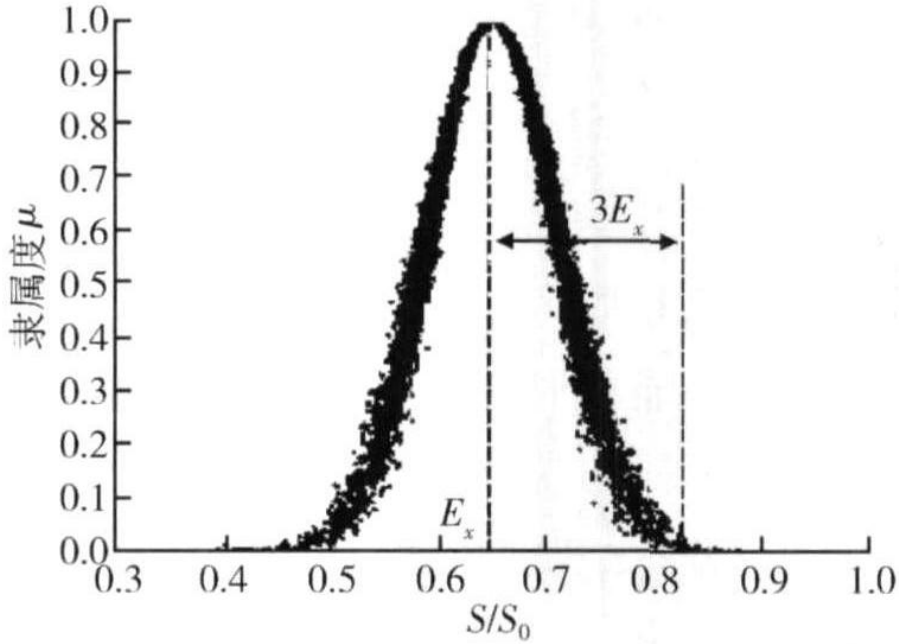


图 9-1：隶属云及其数字特征

9.3.2 基于云模型的定性评测法的基本原理

云重心可以表示为 $T = a \times b$ 。其中， a 表示云重心的位置， b 表示云重心的高度。期望值反应了相应的模糊概念的信息中心值，即云重心位置。当期望值发生变化时，它所代表的信息中心值发生变化，云重心的位置也相应地改变。所以说，通过云重心的变化情况，可以反映出系统状态信息的变化情况。在一般的情况下，云重心的高度取常值(0.317)。

各指标的云模型表示在给出系统的性能指标体系中，既有精确数值型表示的，又有用语言值来描述的。提取 n 组样品组成决策矩阵，那么 n 个精确数值型的指标就可以用一个云模型来表示。其中，

$$E_x = (E_{x1} + E_{x2} + \cdots + E_{xn}) / n$$

$$E_n = [\max(E_{x1}, E_{x2}, \cdots, E_{xn}) - \min(E_{x1}, E_{x2}, \cdots, E_{xn})] / 6$$

同时，每个语言值型的指标都可以用一个云模型来表示，那么 n 个语言值（云模型）表示的一个指标就可以用一个一维综合云来表征。其中，

$$E_x = (E_{x1}E_{n1} + E_{x2}E_{n2} + \cdots + E_{xn}E_{nn}) / (E_{n1} + E_{n2} + \cdots + E_{nn})$$

$$E_n = E_{n1} + E_{n2} + \cdots + E_{nn}$$

用一个 p 维综合云表示具有 p 个性能指标的系统状态，当 p 指标所反映的系

统的状态发生变化时，这个 p 维综合云的形状也发生变化，相应地它的重心就会改变。 p 维综合云的重心 T 用一个维向量来表示，即 $T = (T_1, T_2, \dots, T_p)$ ，其中，当系统的状态发生变化时，其重心变化为 T' ， $T' = (T'_1, T'_2, \dots, T'_p)$ 。

用云模型实现评测的评语集采用由 11 个评语所组成的评语集：
将 11 个评语置于连续的语言值标尺上，并且每个评语值都用云模型来实现，构成一个定性评测的云发生器，如图 9-2 所示。

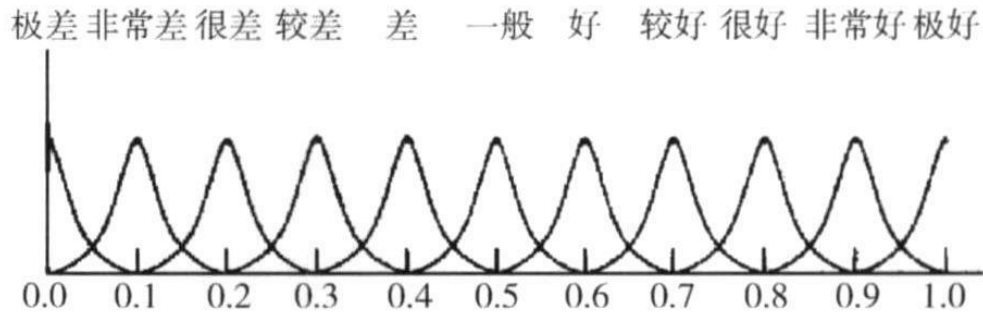


图 9-2：定性评测曲线

9.4 防空信息战系统效能评估

9.4.1 防空信息战系统效能评估

防空信息战效能评估是指利用定性和定量的方法，分析、计算、评价防空信息战系统和系统在执行特定作战任务时所能达到的预期作战目标的程度，它是对防空信息战系统自身效能评估和这个系统在作战条件下的作战效能评估的综合。

9.4.2 效能信度的定义

本文采用效能信度作为评估包含不确定因素的复杂系统—防空信息战系统的效能指标。效能信度是一个两元组 (λ, δ) ， $\lambda \in S$ ， S 为效能状态集合， δ 是系统处于 λ 状态的信任程度， $\delta \in (0, 1)$ 。

效能信度的物理含义是系统处于 λ 效能状态的信任程度。这种描述更加符合人们对于命题分析和判断的过程。其一，效能信息度比较适合结构复杂、存在人为因素的防空信息战系统，它的评估过程同人类的思维过程类似，避开了复杂的结构分析，系统评估的目的性更加明确；其二，效能信度的判断具有更多的灵活性和可扩展性，其适用范围更加宽广。

9.4.3 系统评估模型建立

将防空信息战系统效能的可能性状态定义为

$$S = (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5)$$

其中： S_1 为系统效能很高； S_2 为系统效能较高； S_3 为系统效能一般； S_4 为系统效能较低； S_5 为系统效能很低。

根据心理学的研究，通常情况下，等级划分的数目一般不超过 7 个，以便符合人们辨识力的实际界限，本文选用 5 个状态等级进行评估。

9.4.4 防空信息战系统效能评估的计算

假设有 n 位专家进行防空信息战系统效能的评估，每位专家的评估记为 m_n ，其基本可信度分配为

$$\begin{aligned} m_1(A_1) &= x_1, A_1 = \{S_1\} \\ m_2(A_2) &= x_2, A_2 = \{S_2\} \\ &\dots \\ \sum m_n &= 1 \end{aligned}$$

首先计算各位专家评判中的冲突值

$$k = \sum_{\substack{A_1, A_2, \dots, A_n \subset S \\ A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset}} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n)$$

$0 < k < 1$ 表示虽有冲突但有一致之处； $k = 1$ 表示完全冲突，意见对立，此时无法用 D-S 法则进行合成。当冲突量大于常数 ε ($0 < \varepsilon < 1$) 时，认为判断是无效的。 ε 就是允许的意见分歧程度，应在专家评判开始前确定。一般情况下如果专家的评判未产生大的分歧，则可利用证据合成法进行评判综合。

$$m(A) = \frac{\sum_{\substack{A_1, A_2, \dots, A_n \subset S \\ A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset}} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n)}{1 - k}$$

信度函数的定义：设 Θ 为辨识框架，由一完备的互不相容的陈述集组成， Θ 的幂集构成了命题集合。如果集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ (2^Θ 为 Θ 的幂集，它是 Θ 所有子集的集合) 满足

$$m(\emptyset) = 0, \sum_{A \in \Theta} m(A) = 1$$

此时称 m 为框架上的基本可信度分配。于是有

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B), \forall A \subset \Theta$$

所以定义的函数 $Bel(A): 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为 Θ 上的信度函数。

对于一个命题的信度单用信度函数来描述是不够的，因为 $Bel(A)$ 不能反映怀疑 A 的程度，即相信 A 的非为真的程度。所以为了全面描述对 A 的信任，还必须引入表示怀疑 A 的程度的量，即似真度函数。

似真度函数定义：设 $Bel(A): 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为 Θ 上的一个信度函数。

$$PI: 2^\Theta \rightarrow [0, 1], PI(A) = 1 - Bel(\bar{A}),$$

则称 PI 为 Bel 的似真函数。 $PI(A)$ 称为 A 的似真度，它表示不怀疑 A 的程度或者说发现 A 可靠的程度。

D-S 证据理论对 A 的不确定性描述，可用图 9-3 表示。

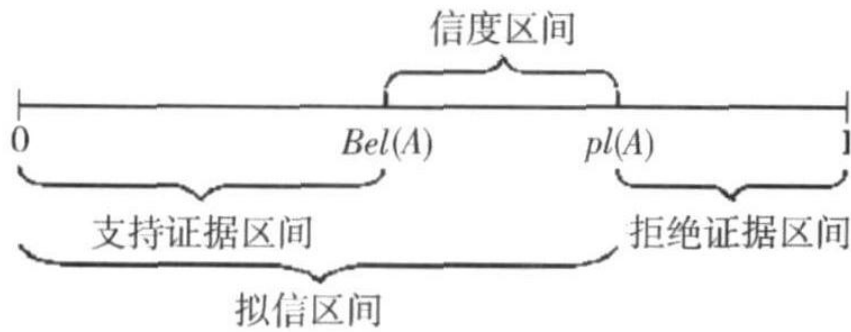


图 9-3：证据区间和不确定性描述

根据式 (9-1)，可以用与 Bel 对应的 m 来重新表示

$$PI(A) = 1 - Bel(\bar{A}) = \sum_{B \subset \Theta} m(B) - \sum_{B \subset A} m(B) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B), \forall A \subset \Theta$$

可见一个事件的合理性是建立在对其相反事件不相信的基础上的。证据推理方法即用基本可信度函数获得证据区间，再通过证据区间量化命题的可信度和似真度。

根据合成结果及信度函数和似真度函数的定义，即可计算每一种状态的信任区间

$$Bel(S_i) = m(S_i), PI(S_i) = \sum_{S \subset B} m(B)$$

区间 $[Bel(S_i), PI(S_i)]$ 就是状态 S_i 的置信区间，则

$$Bel_s(S_i) = Bel(S_i) + [PI(S_i) - Bel(S_i)] \times \{1 - [PI(S_i) - Bel(S_i)]\}$$

式中： $Bel_s(S_i)$ 称为状态 S_i 的效能信度。等号后第 2 项表面：区间越窄，其系统效能信度越高；区间越宽，其系统效能度越低。满足 $\max Bel(S_i)$ 的状态 S_n 是对系统效能评估的结论。

9.4.5 模型的建立

综上所述，建立的系统评估模型为： $S_n = \max Bel_s(S_i)$

$$Bel_s(S_i) = Bel(S_i) + [PI(S_i) - Bel(S_i)] \times \{1 - [PI(S_i) - Bel(S_i)]\}$$

9.5 模型求解与分析

应用上述基于云模型和 D-S 证据推理的方法，采用专家评判对海湾战争防空信息战效能进行评估，其证据来源和取得，突出了专家评判的权威性、代表性，保证了能相对客观地表达各类专家本人的意见，使各种不同的观点得到充分发表。

(1) 根据图 9-1 所示的防空信息战系统的各项指标，设有 3 位专家，对海湾战争防空信息战效能进行评估，结果如表所示

表 9-1：海湾战争防空信息战系统效能定性评估表

状态	专家 1	专家 2	专家 3

S_1 (很高)	一般	好	一般
S_2 (较高)	较差	一般	差
S_3 (一般)	非常差	很差	极差
S_4 (较低)	极差	极差	极差
S_5 (很低)	极差	极差	极差

(2) 利用云理论, 把语言值用相应 3 个数字特征 (E_x, E_n, D) 来表征, 即用一个云对象来表示。然后, E_x 值就可作为表的定量表示值, 从而实现定性到定量的转化, 组成表 9-2。

表 9-2: 海湾战争防空信息战系统效能定量评估表

状态	专家 1	专家 2	专家 3
S_1 (很高)	0.5	0.6	0.8
S_2 (较高)	0.3	0.5	0.4
S_3 (一般)	0.1	0.2	0
S_4 (较低)	0	0	0
S_5 (很低)	0	0	0

(3) 根据证据合成法则进行计算

根据冲突值的定义计算其冲突值为 $k = 0.27$, 设 $\varepsilon = 0.6$, 则有 $k = 0.27 < 0.6$, 因此可以认为此次评估证据有效。根据合成法则进行合成, 得

$$m(S_3) = m(S_4) = m(S_5) = 0$$

$$m(S_1) = 0.64$$

$$m(S_2) = 0.46$$

因此, $Bel(S_1) = 0.64$, $PI(S_1) = 0.64$, $Bel(S_2) = 0.46$, $PI(S_2) = 0.46$

由效能信度函数可得到状态 S_1 到状态 S_5 的信能效率分别为:

$$Bel(S_1) = 0.64, Bel(S_2) = 0.46$$

$$Bel(S_3) = Bel(S_4) = Bel(S_5) = 0$$

则状态 S_1 为该系统效能评估的结论, 即系统在海湾战争作战条件下的效能很高。由此可见, 证据推理方法能够起到证据积累的作用, 而且专家越多, 证据积累作用越明显, 甚至可以接近于 1, 对于系统效能的判断也就比较准确。

9.6 结果分析

海湾战争中美军利用其信息质量和武器质量的优势,运用精确制导武器对伊军指挥信息系统发动了效率前所未有的打击,在一天之内瘫痪伊军的 KARI 战略防空体系,使伊军丧失了制信息权,伊军不知道敌人在哪,也无法了解自己部队的状况,甚至连命令也传达不下去,完全处在被动挨打的地位。

预警、指挥、控制、通信和情报是现代战争赖以进行的重要手段。由于电子战可剥夺敌军在此方面的能力,夺取战场制电磁权,而成为不可缺少的一种作战方式。在战争开始前,美军即使用电子作战飞机对伊军电子设备实施强烈干扰,压制伊军的通信和预警雷达系统,保证了空袭行动的突然性。在战争全过程中,美军又针对伊军的指挥、控制、通信和情报系统实施强大的电子战,对伊军电子设备、防空雷达和通信网络等进行“软压制”。结果,使伊军指挥失灵,通信中断,空中搜索与反击能力丧失,处于被动挨打的地位。

在电子对抗战术运用方面:在“沙漠盾牌”实施的同时,美军就对伊拉克实施广泛的电子侦察,从而较全面地掌握了伊军无线电联络和雷达情况,保证了战时能有效地干扰伊军防御系统和指挥信息系统。通过电子侦察和密码破译等手段,掌握了大量伊军情报。

为争夺制信息权,美军在开战首日就发射了超过 200 枚反辐射导弹,逼迫伊军防空导弹部队大幅降低雷达开机次数。美军发射了大量的无人机,引诱伊军打开雷达,然后,用反辐射导弹摧毁伊军的雷达,使伊军丧失了战场信息感知能力,失去引导的伊军地空导弹只能进行盲目的发射。

由此可以看出海湾战争中多国部队的防空信息战系统效能很高。与模型分析的结果一致,故模型具有一定的适应性。

10. 模型的改进、评价与推广

6.1 模型的优点

(1) 从问题出发，分析了编队方位最佳位置、角度、和距离等各因素，建立概率模型和几何模型来计算编队的抗饱和能力。

(2) 五个问题分别求解，适应性很强且全面。

(3) 舰艇编队面临的空中威胁日益严重，航母编队中如何均匀配置信息化资源，拥有强大防空火力对抗防空导弹，我们的模型对水面舰艇编队所面临的防空问题有借鉴作用。

6.2 模型的缺点

(1) 由于统计资料不够全面，我们在设计最佳编队时，各个因素的确定有一定的偏差。

(2) 为了使计算简便，使所得的结果更理想化，忽略了一些次要因素。

6.3 模型的改进

在建立模型的过程中，可以在模型中考虑各保卫舰之间的网络信息沟通互换、电子干扰和近程火炮，目标高度的影响，但考虑起来较复杂，留着时间充裕时考虑。

6.4 模型的推广

所建立的模型的方法和思想可以推广到我们国家航空多机协同攻击中目标的防空分配，和反舰导弹航路规划算法。本文所建立的模型不仅估算出多信息化战争条件下，能够显著提高水面舰艇防御导弹的战斗能力。如果未来我们增加运用时代信息化技术，信息战中，拥有信息优势且信息力量运用恰当，不仅可以有效地实施“信息垄断”、“信息威慑”，还可以提供“信息支援”和“信息保护伞”，使受到支援和保护的作战力量获得巨大的军事优势，以致成倍地提高战斗力。即用兰彻斯特方程模型思想积极指导我们在以后建立其他更复杂的模型具有重要的意义。

11. 参考文献

- [1] 朱传伟, 杨兴宝, 陆永红. 舰艇编队网络中心反导体系研究[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(2): 12-14.
- [2] 谭乐祖, 杨明军, 王威. 舰空导弹抗饱和攻击能力影响因素仿真分析[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 49—51.
- [3] 陆永红, 钟生新. 水面舰艇防御反舰导弹的技术途径[J]. 现代防御技术, 2001, 6: 008.
- [4] 史彦斌, 高宪军, 张安. 基于兰彻斯特方程的信息支援效能研究[J]. 航空计算技术, 2007, 37(5): 21-24.
- [5] 唐铁军, 徐浩军. 应用兰彻斯特法进行体系对抗效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2008, 32(8): 52-54.
- [6] 刘钢, 老松杨, 谭东风, 等. 舰艇编队导弹航路规划仿真系统设计与实现[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(3): 157-163.
- [7] 张明智, 何章明, 胡晓峰, 等. 面向信息化战争模拟的体系对抗交互模型研究[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(5): 23-27.
- [8] 吴静, 李刚, 邓堃. 基于云模型和D-S 证据推理的防空信息战系统效能评估[J]. 现代防御技术, 2007, 35(6): 12-17.

12. 附录

问题一 Lingo 程序

MODEL:

Title first;

sets:

mianji/1..5/:s;

jiaodu/1..4/:theta;

endsets

data:

k=30;

pi=3.14159;

enddata

max=@smin(0.21*r/60,(@smin(s(1),s(2),s(3),s(4),s(5)))/(pi*k^2));

jiao1=20*pi/180;

jiao2=220*pi/180;

s(1)=k*k-r*r*(@sin(theta(1)-jiao1))^2 ;

s(2)=k*k-r*r*(@sin((theta(2)-theta(1))/2))^2 ;

s(3)=k*k-r*r*(@sin((theta(3)-theta(2))/2))^2 ;

s(4)=k*k-r*r*(@sin((theta(4)-theta(3))/2))^2 ;

s(5)=k*k-r*r*(@sin(jiao2-theta(4)))^2 ;

theta(1)>jiao1;

theta(4)<jiao2;

theta(2)-theta(1)>0.51;

theta(3)-theta(2)>0.51;

theta(4)-theta(3)>0.51;

@for(jiaodu(i)|i#lt#4:theta(i+1)>theta(i));

@bnd(30,r,60);

r*@sin(theta(1)-jiao1)<20;

r*@sin(theta(1)-jiao1)>5;

@for(jiaodu(i)|i#lt#4:r*@sin((theta(i+1)-theta(i))/2)<20;r*@sin((theta(i+1)-theta(i))/2)>5);

r*@sin(jiao2-theta(4))<20;

r*@sin(jiao2-theta(4))>5;

zz=r*@sin(jiao2-theta(4));

pp=@asin(1)/pi*180;

end

MODEL:

Title first;

sets:

mianji/1..5/:s;

```

        jiaodu/1..4:/theta;
endsets
data:
k=30;
pi=3.14159;
enddata
!max=@smin(r/s(1),r/s(2),r/s(3),r/s(4),r/s(5));
!max=@smin(s(1),s(2),s(3),s(4),s(5));
!max=r*@smin(s(1),s(2),s(3),s(4),s(5));
max=@smin(0.2*r/60,(@smin(s(1),s(2),s(3),s(4),s(5)))/(pi*k^2));
!max=r/60*(@smin(s(1),s(2),s(3),s(4),s(5)))/(pi*k^2);
!max=r;
jiao1=20*pi/180;
jiao2=220*pi/180;
s(1)=k*k*@acos(r*@sin(theta(1)-jiao1)/k)
r*@sin(theta(1)-jiao1)*@sqrt(k*k-r*r*(@sin(theta(1)-jiao1))^2) ;
s(2)=2*(k*k*@acos(r*@sin((theta(2)-theta(1))/2)/k)
r*@sin((theta(2)-theta(1))/2)*@sqrt(k*k-r*r*(@sin((theta(2)-theta(1))/2))^2) ;
s(3)=2*(k*k*@acos(r*@sin((theta(3)-theta(2))/2)/k)
r*@sin((theta(3)-theta(2))/2)*@sqrt(k*k-r*r*(@sin((theta(3)-theta(2))/2))^2) ;
s(4)=2*(k*k*@acos(r*@sin((theta(4)-theta(3))/2)/k)
r*@sin((theta(4)-theta(3))/2)*@sqrt(k*k-r*r*(@sin((theta(4)-theta(3))/2))^2) ;
s(5)=k*k*@acos(r*@sin(jiao2-theta(4))/k)
r*@sin(jiao2-theta(4))*@sqrt(k*k-r*r*(@sin(jiao2-theta(4)))^2) ;
theta(1)>jiao1;
theta(4)<jiao2;
@for(jiaodu(i)|i#lt#4:theta(i+1)>theta(i));
@bnd(30,r,60);
r*@sin(theta(1)-jiao1)<k;
r*@sin(theta(1)-jiao1)>5;
@for(jiaodu(i)|i#lt#4:r*@sin((theta(i+1)-theta(i))/2)<k;r*@sin((theta(i+1)-theta(i))/2)>5);
r*@sin(jiao2-theta(4))<k;
r*@sin(jiao2-theta(4))>5;
zz=r*@sin(jiao2-theta(4));
pp=@asin(1)/pi*180;

```

问题四 matlab 程序

% 数据预处理及剔除

```

clear all;
close all ;
clc
[q,data]=xlsread('12.xls','Sheet1');
data(1,:)=[];
a=zeros(size(data)) ;

```



```

for i=1:size(data,1)
    for j=1:size(data,2)
        a(i,j)=str2double(data{i,j});
    end
end
% 目标 ID，作战时间，目标纬度，目标经度，目标高度
% 舰艇坐标转换为度数
zhuanhuan=zeros(size(a,1),9);
point0=[112+42/60+10/60/60,15+41/60+7/60/60];
% 雷达反射面积
duiying=[41006893,3.1;
         41006830,3.5;
         41006831,5.7;
         41006836,1.9;
         41006837,4.3;
         41006839,5.5;
         41006842,2.6;
         41006851,5.5;
         41006860,6.2;
         41006872,1.7;
         41006885,1.1;
         41006891,3.6];
kong=[];
for i=1:size(a,1)
    %id
    zhuanhuan(i,1)=a(i,1);
    %高度
    zhuanhuan(i,6)=a(i,5)/1000;
    %经度
    zhuanhuan(i,8)=a(i,4)*180/pi;
    %纬度
    zhuanhuan(i,9)=a(i,3)*180/pi;
    %距离
    zhuanhuan(i,3)=sqrt((getDis([a(i,4),a(i,3)]*180/pi,point0))^2+(a(i,5)/1000)^2);
    %雷达反射面积
    [tempx,tempy]=find(a(i,1)==duiying);
    if isempty(tempx)
        kong=[kong,i];
        continue ;
    end
    zhuanhuan(i,7)=duiying(tempx,2);
end
% getDis([112,15],[110,30])
zhuanhuan=roundn(zhuanhuan,-2);

```

```

a=sortrows(a,2);
% 显示
for i=1:size(duiying,1)
    index=find(a==duiying(i,1)) ;
    x=a(index,4)*180/pi;
    y=a(index,3)*180/pi;
    z=a(index,5)/1000;
    t=a(index,2)-1471427976;
    xuz=figure;plot(t,x,'*r')
        title(strcat('目标 ID',' ',num2str(duiying(i,1))))
        xlabel('相对时间')
        ylabel('经度')
    set(xuz,'position',[10,10,270,250]) ;
end

%%
% 数据转换
clear all;
close all ;
clc
[q,data]=xlsread('12.xls','Sheet1');
data(1,:)=[];
% 目标 ID, 作战时间, 目标纬度, 目标经度, 目标高度
a=zeros(size(data)) ;
for i=1:size(data,1)
    for j=1:size(data,2)
        a(i,j)=str2double(data{i,j});
    end
end
end
% 目标 ID, 方位角, 距离, 水平速度, 航向角, 高度, 雷达反射面积, 经度, 纬度, 时间
zhuanhuan=zeros(size(a,1),10);
% 舰艇坐标转换为度数
point0=[112+42/60+10/60/60,15+41/60+7/60/60];
% 雷达反射面积
duiying=[41006893,3.1;
    41006830,3.5;
    41006831,5.7;
    41006836,1.9;
    41006837,4.3;
    41006839,5.5;
    41006842,2.6;
    41006851,5.5;
    41006860,6.2;

```

```

41006872,1.7;
41006885,1.1;
41006891,3.6];
kong=[];
for i=1:size(a,1)
    %id
    zhuanhuan(i,1)=a(i,1);
    %时间
    zhuanhuan(i,10)=a(i,2)-1471427976;
    %高度
    zhuanhuan(i,6)=a(i,5)/1000;
    %经度
    zhuanhuan(i,8)=a(i,4)*180/pi;
    %纬度
    zhuanhuan(i,9)=a(i,3)*180/pi;
    %距离
    zhuanhuan(i,3)=sqrt((getDis([a(i,4),a(i,3)]*180/pi,point0))^2+(a(i,5)/1000)^2);
    %雷达反射面积
    [tempx,tempy]=find(a(i,1)==duiying);
    if isempty(tempx)
        kong=[kong,i];
        continue ;
    end
    zhuanhuan(i,7)=duiying(tempx,2);
end
% getDis([112,15],[110,30])
zhuanhuan=sortrows(zhuanhuan,10);
%剔除重复数据
ttd=zhuanhuan(:,10);
ttd=unique(ttd);
result=[];
count=1;
for i=1:size(duiying,1)
    index=find(zhuanhuan==duiying(i,1)) ;
    [curve, goodness, output] = fit(zhuanhuan(index,10),zhuanhuan(index,8),'smoothingspline');
    jingdu=feval(curve,ttd) ;
    [curve, goodness, output] = fit(zhuanhuan(index,10),zhuanhuan(index,9),'smoothingspline');
    weidu=feval(curve,ttd) ;
    [curve, goodness, output] = fit(zhuanhuan(index,10),zhuanhuan(index,3),'smoothingspline');
    juli=feval(curve,ttd) ;
    temp2=zhuanhuan(index,:);
    for j=1:length(ttd)
        index=find(temp2(:,10)==ttd(j));
        if length(index)==1

```

```

        result(count,:)=temp2(index,:);
    else
        result(count,:)=temp2(index(1),:);
        result(count,8)=jingdu(j);
        result(count,9)=weidu(j);
        result(count,3)=juli(j);
    end
    count=count+1;
end
end

enddata=[];
count=1;
% 求方位角、水平速度、航向角
for i=1:size(duying,1)
    index=find(result==duying(i,1)) ;
    temp2=result(index,:);
    temp2=sortrows(temp2,10);
    for j=1:length(temp2)-1
        enddata(count,1)=temp2(j,1);
        enddata(count,2)=getTheta(temp2(j,8),temp2(j,9),point0(1),point0(2))*6400/360;
        enddata(count,3)=temp2(j,3);

        enddata(count,4)=getDis([temp2(j,8),temp2(j,9)],[temp2(j+1,8),temp2(j+1,9)])*1000/(temp2(j+1,10)-temp2(j,10));
        enddata(count,5)=getTheta(temp2(j+1,8),temp2(j+1,9),temp2(j,8),temp2(j,9));
        enddata(count,6)=temp2(j,6);
        enddata(count,7)=temp2(j,7);
        enddata(count,8)=temp2(j,8);
        enddata(count,9)=temp2(j,9);
        enddata(count,10)=temp2(j,10)+1471427976;
        count=count+1;
    end
end

writedata={'目标 ID','方位角','距离','水平速度','航向角','高度','雷达反射面积','经度','纬度','时间','目标属性'};
for i=1:size(enddata,1)
    for j=1:size(enddata,2)
        writedata{i+1,j}=num2str(enddata(i,j));
    end
    if enddata(i,7)>=0 && enddata(i,7)<2
        writedata{i+1,11}='小目标';
    else

```

```

        if enddata(i,7)<4
            writedata{i+1,11}='中目标';
        else
            writedata{i+1,11}='大目标';
        end
    end
end
% xlswrite('data.xls',writedata)

%% SVM 神经网络的数据分类预测
close all;
clear all;
clc
train=xlsread('train.xls');
reg=xlsread('reg.xls');
temp=[reg(:,2),reg(:,3),reg(:,4),reg(:,5),reg(:,6),reg(:,11)];
format compact;

% 选定训练集和测试集
train_wine = train(:,1:end-1);
% 相应的训练集的标签也要分离出来
train_wine_labels = train(:,end);
% 将第一类的 31-59,第二类的 96-130,第三类的 154-178 做为测试集
test_wine = temp;
% 相应的测试集的标签也要分离出来
test_wine_labels = zeros(size(test_wine,1),1);

% 数据预处理
% 数据预处理,将训练集和测试集归一化到[0,1]区间
[mtrain,ntrain] = size(train_wine);
[mtest,ntest] = size(test_wine);

dataset = [train_wine;test_wine];
% mapminmax 为 MATLAB 自带的归一化函数
[dataset_scale,ps] = mapminmax(dataset',0,1);
%dd = mapminmax('reverse',dataset_scale,ps);反归一化
dataset_scale = dataset_scale';

train_wine = dataset_scale(1:mtrain,:);
test_wine = dataset_scale( (mtrain+1):(mtrain+mtest),: );
% SVM 网络训练
model = svmtrain(train_wine_labels, train_wine,'-c 2 -g 1');

% SVM 网络预测

```

```
[predict_label, accuracy, ccc] = svmpredict(test_wine_labels, test_wine, model);
```

```
% 结果分析
```

```
duiying=[41006893,3.1;
```

```
41006830,3.5;
```

```
41006831,5.7;
```

```
41006836,1.9;
```

```
41006837,4.3;
```

```
41006839,5.5;
```

```
41006842,2.6;
```

```
41006851,5.5;
```

```
41006860,6.2;
```

```
41006872,1.7;
```

```
41006885,1.1;
```

```
41006891,3.6];
```

```
for i=1:size(duiying,1)
```

```
index=find(reg==duiying(i,1)) ;
```

```
z=figure;plot(reg(index,10),predict_label(index),'*')
```

```
title(strcat('目标',num2str(duiying(i,1)), '的意图'))
```

```
xlabel('时间')
```

```
ylim([0,6])
```

```
xlim([min(reg(index,10))-3,max(reg(index,10))+3])
```

```
set(gca,'yTickLabel',{'','侦察','攻击','掩护','监视','其它',''})
```

```
set(z,'position',[10,10,270,250]) ;
```

```
end
```